



# Opto-alimentation et transmission de données par fibre optique pour les observatoires de fond de mer

Frédéric Audo

## ► To cite this version:

Frédéric Audo. Opto-alimentation et transmission de données par fibre optique pour les observatoires de fond de mer. Autre. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2012. Français. NNT : 2012BRES0014 . tel-00782502v3

**HAL Id: tel-00782502**

**<https://theses.hal.science/tel-00782502v3>**

Submitted on 28 Feb 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



université de bretagne  
occidentale



## THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

*sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne*

pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE**

*Mention : Sciences et Technologies de l'Information et de la  
Communication (STIC)*

*Spécialité : Optoélectronique, Hyperfréquences*

**École Doctorale SICMA 0373**

présentée par

**Frédéric Audo**

Préparée au Laboratoire Lab-STICC,  
UMR CNRS 6285

École Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB)

# Opto-alimentation et transmission de données par fibre optique pour les observatoires de fond de mer

**Thèse soutenue le 3 décembre 2012**

devant le jury composé de :

**Bernard ORSAL**

Professeur des Universités à Montpellier 2 / Rapporteur

**Jean-Pierre VILCOT**

Directeur de Recherche CNRS à Lille 1 / Rapporteur

**Yves AUFFRET**

Ingénieur-Docteur à l'IFREMER à Brest / Examinateur

**Pascal BESNARD**

Professeur des Universités à l'ENSSAT à Lannion / Examinateur

**Patrice LE ROUX**

Ingénieur à Alcatel Lucent Submarine Networks à Nozay / Examinateur

**André PÉRENNOU**

Professeur des Universités à l'ENIB à Brest / Directeur de thèse

**Mikael GUÉGAN**

Maître de Conférences à l'ENIB à Brest / Encadrant

**Véronique QUINTARD**

Maître de Conférences à l'ENIB à Brest / Encadrant



## Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au laboratoire Lab-STICC, UMR CNRS 6285, à l'École Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB), sous la direction de Jean LE BIHAN et d'André PÉRENNOU, Professeurs des Universités.

Je tiens à remercier Monsieur Jean LE BIHAN pour son soutien scientifique et pour la confiance qu'il a pu m'accorder. Je remercie particulièrement Monsieur André PÉRENNOU pour sa direction avisée et la rigueur scientifique apportée lors de cette thèse.

Je tiens également à remercier Madame Véronique QUINTARD et Monsieur Mikael GUÉGAN, pour m'avoir encadré avec Monsieur André PÉRENNOU. Cette équipe m'a dirigé, soutenu et motivé pendant l'ensemble de la thèse. Je leur suis reconnaissant pour les nombreuses discussions fructueuses lors des réunions de travail et leur disponibilité tout au long de la thèse.

Je remercie Monsieur Pascal BESNARD, Professeur des Universités à l'ENSSAT à Lannion, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse. J'exprime également ma sincère gratitude à Monsieur Bernard ORSAL, professeur des Universités à l'Université de Montpellier 2, et à Monsieur Jean-Pierre VILCOT, Directeur de recherche CNRS à l'Université de Lille 1, pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Je tiens aussi à remercier Monsieur Yves AUFFRET, Ingénieur-Docteur à l'IFREMER à Brest, et Monsieur Patrice LE ROUX, ingénieur à Alcatel Lucent Submarine Networks à Nozay, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens également à être reconnaissant envers M. Steven PERHIRIN et M. Serge DE BLASI avec qui je travaille dans le cadre du projet Opto-alim. Je remercie aussi l'ensemble des personnes qui m'ont soutenu, scientifiquement ou moralement, durant l'ensemble de ces quatre années, dont le personnel du laboratoire et notamment les thésards passés et présents.

Enfin, je tiens à remercier mes parents, mes frères et mes amis qui m'ont soutenus et encouragés pendant toutes ces années d'études.





# Table des matières

Introduction générale.....	3
Chapitre 1 : État de l'art .....	7
Introduction du chapitre 1 .....	8
1.1. Observatoires sous-marins .....	9
1.1.1. Objectifs scientifiques des observatoires sous-marins.....	9
1.1.2. Architecture des observatoires de fond de mer .....	10
1.1.3. Le développement des observatoires câblés de fond de mer .....	13
1.1.4. Projet opto-alimentation : étendre un réseau câblé .....	22
1.2. Puissance sur fibre optique.....	24
1.2.1. Présentation de la puissance sur fibre .....	24
1.2.2. État de l'art de la puissance sur fibre .....	25
1.2.3. Paramètres clés de la puissance sur fibre .....	38
1.3. Contexte de la thèse.....	42
Conclusion du chapitre 1 .....	44
Chapitre 2 : Architecture du prototype de l'extension tout-optique.....	47
Introduction du chapitre 2 .....	48
2.1. Réflexions sur l'élaboration du dispositif tout-optique.....	50
2.1.1. Choix technologiques.....	50
2.1.2. Effet destructif : fusion de fibre (« Fiber Fuse ») .....	53
2.1.3. Description des phénomènes optiques .....	56
2.2. Dispositif expérimental .....	63
2.2.1. Présentation du dispositif.....	63
2.2.2. Conversion E/O.....	64
2.2.3. Composants.....	68
2.2.4. Conversion O/E.....	71
Conclusion du chapitre 2.....	79
Chapitre 3 : Caractérisation en régime statique.....	81
Introduction du chapitre 3 .....	82
3.1. Dispositif expérimental : description du banc.....	84
3.2. Caractérisation du transport de la puissance .....	88
3.2.1. Transport de la puissance.....	88
3.2.2. Caractérisation du module de conversion O/E.....	91
3.3. Caractérisations de l'amplification Raman .....	93
3.3.1. Superposition de la puissance et des données descendantes.....	93
3.3.2. Optimisation de l'amplification Raman pour notre dispositif .....	95
3.4. Caractérisations : superposition de la puissance et des données.....	101
3.4.1. Superposition de la puissance et des données descendantes.....	101
3.4.2. Superposition de la puissance et des données montantes .....	104
3.4.3. Superposition de la puissance et des données descendantes et montantes	106
3.5. Modélisation des phénomènes optiques dans notre dispositif .....	111
3.5.1. La diffusion Raman.....	111
3.5.2. La diffusion Brillouin .....	117
3.5.3. La double rétrodiffusion Rayleigh .....	119

3.5.4.	Équations d'évolutions.....	121
3.6.	Mise en application du modèle.....	124
3.6.1.	Comparaison des résultats de modélisation aux résultats expérimentaux	124
3.6.2.	Évolution des phénomènes optiques .....	126
Conclusion du chapitre 3 .....		129
Chapitre 4 : Caractérisation en régime dynamique et synthèse des résultats sur le dispositif .....		
		131
Introduction du chapitre 4 .....		132
4.1.	Dispositif de qualification de la transmission du signal.....	133
4.1.1.	Dispositif expérimental .....	133
4.1.2.	Taux d'erreur binaire et pénalité en puissance .....	135
4.1.3.	Diagramme de l'œil .....	135
4.1.4.	Conditions de mesures .....	136
4.2.	Qualification du signal transmis.....	139
4.2.1.	Superposition de la puissance et des données co- ou contra-propagatives	139
4.2.2.	Superposition de la puissance et des données échangées simultanément.	141
4.2.3.	Diffusion Raman : transfert de RIN.....	144
4.3.	Synthèse des résultats.....	148
4.3.1.	Validité du prototype .....	148
4.3.2.	Mesures à une fréquence de 5 MHz.....	149
4.3.3.	Interface électronique.....	151
Conclusion du chapitre 4.....		153
Conclusion et perspectives .....		155
Annexes .....		159
Annexe A.	Modélisation du transfert de RIN.....	161
Annexe B.	Photographies du dispositif expérimental .....	167
Glossaire.....		169
Bibliographie.....		173
Publications .....		181
Liste des figures .....		183
Liste des tableaux.....		190

# Introduction générale

Les océans sont des zones encore peu explorées et notamment les fonds océaniques. Dans le but d'observer, de surveiller et de comprendre leurs comportements, des réseaux d'observatoires sont mis en place depuis peu pour fournir des informations dans de nombreux domaines scientifiques : en géophysique, en physique des océans, ou en biologie. Dans le passé, les observations des fonds marins étaient réalisées par des expéditions maritimes de durées relativement courtes (quelques semaines à quelques mois). Mais actuellement, ce type d'observation ne suffit plus. Pour comprendre les phénomènes mis en évidence lors des campagnes d'observation, puis prédire l'évolution de l'environnement marin, il est nécessaire de réaliser des mesures en continu sur une longue période. De plus, dans le cadre de la surveillance et de la prévention des risques sismiques notamment, il est également nécessaire d'avoir un suivi en temps réel. Ainsi aujourd'hui, apparaît un nouveau mode d'investigation des océans au travers du déploiement d'infrastructures devant allier une durée d'exploitation importante (cela nécessite une fiabilité maximale de l'infrastructure et des instruments), la transmission de l'énergie pour alimenter l'instrument de façon pérenne et la transmission bidirectionnelle en temps réel des données et des instructions de pilotage ou de commande. Parmi les modes d'investigation existants, les observatoires câblés de fond mer sont actuellement en fort développement. Un observatoire câblé correspond à une infrastructure où les instruments sont physiquement connectés à une station terrestre via un câble sous-marin. De tels observatoires permettent de transmettre des données sur le long terme, en temps réel, de façon bidirectionnelle avec une grande bande passante. Ils peuvent également fournir l'énergie nécessaire pour l'alimentation des instruments et cela sans limite de temps. Il s'agit en général d'architectures lourdes car nécessitant des moyens importants pour leur mise en place et figées, en raison du coût des interventions employant des moyens importants au fond de la mer.

Le but recherché lors de l'utilisation de tels observatoires, de manière générale, consiste à recueillir le maximum de données multidisciplinaires à l'aide d'un grand nombre d'instruments, en recouvrant efficacement une grande zone d'intérêt, et ceci tout en cherchant à limiter les coûts. Ainsi, dans certaines situations, il peut être intéressant d'étendre le réseau déjà déployé pour ajouter des instruments dans une nouvelle zone d'intérêt, située à quelques kilomètres du réseau existant. Cela implique donc de connecter de nouveaux câbles et de nouveaux instruments au réseau existant. Or généralement, l'installation d'une nouvelle liaison est difficile et onéreuse, car elle nécessite de déposer un nouveau câble électro-optique et sollicite aussi une logistique très importante, équivalente à celle nécessaire pour installer l'observatoire câblé lui-même.

Il est donc important de rechercher une alternative économique pour étendre un observatoire câblé existant. Afin de répondre à cette problématique, nous proposons une solution qui consiste à étendre le réseau à l'aide d'une seule fibre optique transportant à la fois : l'énergie nécessaire à l'alimentation des instruments, et les données échangées entre les instruments et la station terrestre.

Le principal avantage d'une solution avec un câble tout optique est sa flexibilité, de par la possibilité de déployer un tel équipement avec des moyens légers de type ROV (Remotely Operated Vehicle) par comparaison avec les navires câbliers traditionnels, compte tenu du faible encombrement de la fibre optique et de son faible poids dans l'eau en l'absence de conducteur en cuivre. L'objectif de notre projet, nommé opto-alimentation, est de montrer la faisabilité de cette solution attractive en évaluant les possibilités, les contraintes et les limites de fonctionnement de l'architecture tout-optique et en mettant en place un démonstrateur. Le projet se compose de trois domaines d'étude : l'étude de la transmission tout-optique de la puissance et des données sur la fibre optique, la mise en place d'une électronique embarquée basse consommation, et la construction du démonstrateur déployable en milieu marin. Ce projet, mené par le laboratoire Lab-STICC de l'ENIB en collaboration avec l'IFREMER, est soutenu par le GIS Europôle Mer, la Région Bretagne et l'Union Européenne (FEDER).

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit se concentre sur la première partie du projet : la liaison tout-optique. Dans ce cadre, l'objectif est de montrer la possibilité de transmettre de la forte puissance et des données sur une seule fibre optique. Nous devons faire face à plusieurs points critiques. Tout d'abord, la conception du dispositif doit tenir compte des contraintes imposées par l'environnement marin. En effet, le cahier des charges que nous devons élaborer dépend des caractéristiques de l'extension (la distance à parcourir, la puissance électrique à fournir aux instruments, le débit imposé aux données, etc.). Ensuite, Nous devons prendre en compte les interactions existantes entre la puissance et les données lors de leur propagation, car des effets non-linéaires (diffusion Raman, diffusion Brillouin, etc.) apparaîtront inévitablement compte tenu du niveau de puissance nécessaire. Nous devons donc étudier l'importance de ces phénomènes physiques, afin de rechercher ensuite à s'en affranchir ou à en bénéficier. Enfin, nous devons également évaluer la conversion optique/électrique de la puissance au niveau de l'instrument. En effet, les composants opto-électroniques commercialisés en général ne sont pas destinés à des applications de forte puissance. Il est donc nécessaire de trouver une solution viable pour améliorer le rendement de conversion optique/électrique. Après une phase de développement d'un prototype et de caractérisation expérimentale, nous serons en mesure d'estimer les performances et les limites d'une telle liaison. Les informations tirées de ce travail serviront pour l'élaboration de l'électronique embarquée et pour la mise en place prochaine du démonstrateur.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente tout d'abord les méthodes d'investigation des fonds marins. Nous nous intéressons plus particulièrement aux observatoires câblés et à leur évolution historique. Nous abordons également les moyens employés pour réduire le coût d'une telle infrastructure. Nous posons ensuite le problème de l'extension de ces réseaux câblés. Ceci nous amène à proposer, comme solution, une extension tout-optique. La transmission de données par fibre optique est une technique bien maîtrisée, notamment dans le cas des observatoires câblés. Cependant, la transmission de la puissance sur fibre est une technique moins utilisée. Nous présentons donc dans la seconde partie du chapitre un état de l'art de la puissance sur fibre. Différentes structures peuvent être identifiées selon leurs performances (dont la distance à atteindre et la puissance délivrée). L'ensemble de ces informations nous permet de mettre en place le cahier des charges et de préparer la conception de notre dispositif expérimental.

Le second chapitre est consacré à l'élaboration de notre dispositif expérimental de validation de l'extension tout-optique. Nous choisissons les composants et les paramètres optiques (sources laser, fibre optique, longueurs d'ondes, puissance laser émise, etc.) en

tenant compte des contraintes technologiques et physiques, tout en respectant le cahier des charges. Étant donné la forte puissance transmise dans la fibre, nous rappelons et décrivons rapidement les effets physiques engendrés lors la propagation des ondes optiques, et les dégâts pouvant être occasionnés. Nous décrivons ensuite l'architecture de notre dispositif, ainsi que les caractéristiques des composants choisis. Nous terminons ce chapitre par l'étude de la conversion optique/électrique, réalisée par des cellules photovoltaïques. Nous présentons les caractérisations expérimentales des cellules retenues, puis nous argumentons sur l'architecture du module de conversion élaborée, afin d'accroître le rendement de conversion au niveau de l'instrument.

Le troisième chapitre présente la caractérisation du dispositif expérimental en régime statique. Nous superposons la puissance et les données non modulées et nous observons les spectres en différents points du dispositif. Nous nous intéressons plus particulièrement à un phénomène physique généré lors de la propagation de la puissance sur une fibre optique : l'amplification Raman. Nous réalisons une étude expérimentale en fonction de différents paramètres afin de savoir comment tirer au mieux profit de ce phénomène. D'autre part, nous proposons un modèle théorique de la propagation des ondes optiques dans la fibre optique, en nous appuyant sur des modèles existants dans la littérature. Nous cherchons à valider tout d'abord ce modèle en comparant les résultats de la simulation aux résultats expérimentaux. Nous utilisons ensuite ce modèle associé à nos mesures pour déterminer les contributions respectives des différents phénomènes intervenant lors de la propagation (la diffusion Raman, la diffusion Brillouin et la double rétrodiffusion Rayleigh).

Le quatrième chapitre présente la caractérisation du dispositif expérimental en régime dynamique. Tout d'abord, nous présentons à nouveau le dispositif expérimental avec les composants supplémentaires et nécessaires pour cette caractérisation. Nous définissons les principales mesures à réaliser pour évaluer la qualité de transmission, dont le taux d'erreur binaire. Nous analysons les résultats obtenus dans les différentes configurations de superposition de la puissance et des données. Les résultats expérimentaux nous amènent à étudier de nouveau la diffusion Raman pour expliquer les effets observés sur les données, et conclure sur l'utilisation adéquate du dispositif. Enfin, nous discutons de la validité du prototype en synthétisant l'ensemble des résultats, vis-à-vis des contraintes du cahier des charges. Nous nous appuyons enfin sur les travaux de la partie électronique du projet pour délimiter le cadre de fonctionnement de notre dispositif tout-optique, afin de répondre aux exigences du cahier des charges et des besoins de l'électronique embarquée.



# Chapitre 1 : État de l’art

## Sommaire

Introduction du chapitre 1 .....	8
1.1. Observatoires sous-marins .....	9
1.1.1. Objectifs scientifiques des observatoires sous-marins.....	9
1.1.2. Architecture des observatoires de fond de mer .....	10
1.1.3. Le développement des observatoires câblés de fond de mer .....	13
1.1.4. Projet opto-alimentation : étendre un réseau câblé .....	22
1.2. Puissance sur fibre optique.....	24
1.2.1. Présentation de la puissance sur fibre .....	24
1.2.2. État de l’art de la puissance sur fibre .....	25
1.2.3. Paramètres clés de la puissance sur fibre .....	38
1.3. Contexte de la thèse.....	42
Conclusion du chapitre 1 .....	44



## Introduction du chapitre 1

Les océans et les mers couvrent plus des deux tiers de notre planète. Cependant, ceux-ci sont des zones encore peu explorées, notamment les fonds océaniques. Dans le but d'observer, de surveiller et de comprendre le comportement des océans, des réseaux d'observatoires sont progressivement mis en place pour fournir des informations dans de nombreux domaines scientifiques : en géophysique, en océanographie physique, en biologie, ou en chimie par exemple. Les données recueillies peuvent alors améliorer la compréhension et la prévision de phénomènes tels que la dynamique de la lithosphère océanique incluant les systèmes tectoniques, les séismes et les tsunamis, ou les relations entre l'océan, l'atmosphère et l'évolution du climat. Ainsi le développement de moyens d'observation des océans est actuellement un sujet de recherche très important de par la grande diversité des informations qu'il est possible d'extraire.

Dans un premier temps (section 1.1), nous présentons l'évolution historique de l'observation sous-marine et les moyens employés. Nous distinguons ainsi plusieurs types d'observatoires et, parmi ceux-ci, nous mettons l'accent sur les observatoires câblés qui couvrent essentiellement des zones d'intérêts ciblées. Néanmoins, lorsque l'on souhaite étudier des zones distantes de quelques kilomètres de ces zones d'observation, il est intéressant d'étendre ces observatoires pour disposer de nouveaux instruments de mesure. Afin de faciliter le déploiement, nous proposons d'employer des fibres optiques pour transmettre les données et transporter l'énergie d'alimentation. Ce dernier point, qui fait l'objet de ce travail de thèse, correspond à un domaine particulier et encore peu exploité de l'utilisation de la fibre optique : la puissance sur fibre.

La fibre optique est un élément clé de la révolution des télécommunications et elle est aujourd'hui privilégiée pour assurer les transferts de données à haut débit pour tout type de communications telles que le téléphone ou Internet. Dans le domaine des réseaux câblés sous-marins, la fibre optique est déployée pour transmettre des informations entre un utilisateur et un instrument, telles que des instructions ou des mesures. Il peut donc être intéressant d'adapter cette liaison optique pour apporter l'énergie à l'instrument.

Ainsi dans un second temps (section 1.2), nous décrivons le principe, les avantages et les limitations de la puissance sur fibre au travers d'un état de l'art. À l'image des télécommunications optiques qui transmettent des informations par fibre optique, la puissance sur fibre utilise ce support pour transmettre l'énergie d'alimentation. Nous distinguons ainsi plusieurs catégories de systèmes opto-alimentés, déterminées en fonction de la technologie employée et du but à atteindre. Nous retirons les principales caractéristiques de la puissance sur fibre et nous présentons les applications qui en tirent avantage. Cette description fournit ainsi des informations pour concevoir l'architecture du dispositif développé dans le projet.

Nous terminons ce chapitre (section 1.3) par une discussion sur la mise en place d'une architecture dans le contexte d'un déploiement sous-marin. À partir des informations détaillées auparavant, nous déterminons les possibilités, les limites et les contraintes de cette architecture possédant une liaison tout-optique. Puis, nous établissons un cahier des charges décrivant les besoins auxquels il nous faut répondre dans le cadre de l'extension des observatoires de fond de mer. Le projet étant défini, nous décrivons ensuite l'objectif de notre travail qui consiste à étudier en laboratoire la transmission optique des données et de la puissance entre une station terrestre et un instrument, ainsi que la conversion de l'énergie du format optique au format électrique au niveau de l'instrument.

## 1.1. Observatoires sous-marins

### 1.1.1. Objectifs scientifiques des observatoires sous-marins

La planète Terre est composée de nombreux continents terrestres recouverts de vie. L'exploration de notre planète s'est faite essentiellement en surface. Mais, nous connaissons mal les océans qui occupent pourtant 70% de celle-ci, ainsi que les interactions avec l'environnement à la surface. Par exemple, comprendre les liens entre l'environnement et la circulation océanique peut permettre de prédire l'évolution future du climat (Figure 1.1). Les modes d'investigation doivent être adaptés aux recherches menées selon la durée des mesures ou la dimension de la zone à couvrir. En effet, nous savons que les continents ou les océans ne sont pas statiques, mais dynamiques et cela à l'échelle planétaire sur des années, voire des siècles. Un événement comme un tremblement de terre ou un tsunami ne s'évalue pas de la même manière que les changements climatiques. Il en est de même pour des événements tels que l'évolution de la biodiversité et de l'écosystème, et les interactions biophysiques. L'observation scientifique idéale consiste donc à établir des mesures de multiples paramètres à très long terme, en de nombreux points du globe, et accessibles en temps réel.

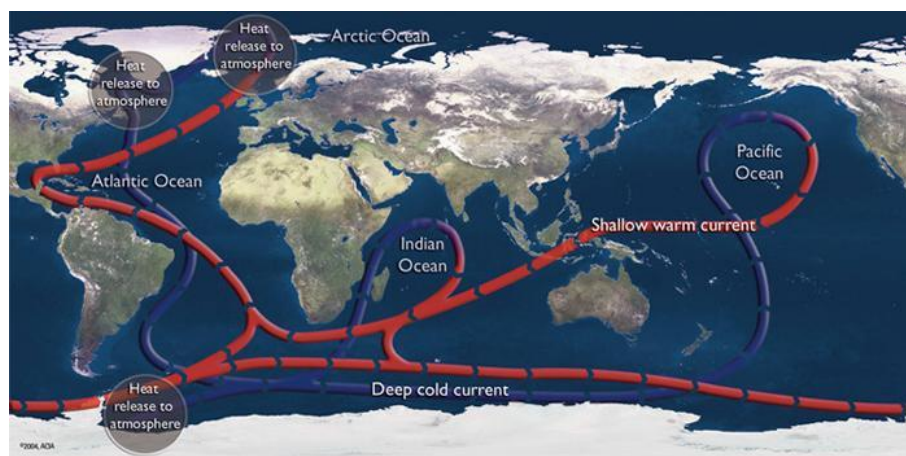


Figure 1.1 : Carte de la planète Terre et des principaux courants océaniques [ACIA 04].

L'observation de fond de mer permet d'apporter des réponses dans de nombreux secteurs scientifiques liés à l'environnement et à l'océan. Les processus étudiés pourront ainsi être traités à différentes échelles de temps. Il est possible de classer les besoins parmi trois échelles temporelles : les phénomènes périodiques courts, les phénomènes dont la période s'étend de quelques mois à quelques années, et les phénomènes globaux et à long terme [Favali 06]. Le premier cas concerne les tremblements de terre, les éruptions des dorsales océaniques, la convection de plaques océaniques ou les conséquences biologiques, chimiques et physiques de tempêtes. Tandis que le second cas concerne l'activité des monts hydrothermaux et leurs variations de biomasse, ainsi que la surveillance des côtes, et l'évolution de la faune et de la flore. Enfin, la dernière catégorie inclut par exemple le suivi de la lithosphère océanique et la circulation thermohaline.

La majorité des connaissances sur les océans provient des expéditions maritimes réalisées à partir de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Aujourd'hui, les bateaux spécialisés dans la recherche halieutique et océanographique sont des laboratoires flottants comportant de nombreux instruments utilisés depuis le bateau. IFREMER possède ainsi l'Atalante (Figure 1.2), un

navire de recherche pluridisciplinaire transportant le submersible habité type Nautilus et un robot téléopéré (ou ROV : Remotely Operated Vehicle) : Victor 6000 [IFREMER 11]. Ses domaines de compétence sont l'océanographie physique, la biologie marine et les géosciences marine.



Figure 1.2 : Photographie du navire de recherche Atalante [IFREMER 2002].

Ces explorations, locales et de relative courte durée, sont inadaptées pour comprendre des phénomènes étendus à l'échelle de la planète et évoluant sur le long terme [Puillat 12]. Afin d'atteindre ce degré d'observation, les recherches nécessiteraient un effort considérable d'étude à long terme (entre quelques mois ou quelques années) et de coordination de plusieurs équipes déployées sur le terrain. Nous pouvons citer le projet MOVE (Meridional Overturning Variability Experiment) lors duquel une campagne, menée en 2002, consistait à déployer des instruments sur des lignes de mouillage [IFREMER 02]. Les instruments effectuaient des mesures toutes les dix minutes pendant un an, avant la récupération des lignes par un navire laboratoire. Cependant, de manière à effectuer des relevés sur du long terme, il est nécessaire de recourir à d'autres moyens : les observatoires de fond de mer.

### 1.1.2. Architecture des observatoires de fond de mer

Le symposium des observatoires de fond de mer à Islamorada (Floride) en 2000 a été l'occasion de discuter de l'évolution et du futur des observatoires sous-marins [NRC 00]. Le NRC (National Research Council) a alors donné une définition complète du terme « observatoire de fond de mer » pour la première fois : « [...] *un système sans équipage, à un site fixe, d'instruments, de capteurs, et de modules de commandes connectés au continent soit de façon acoustique, ou via une boîte de jonction sous-marine liée à une bouée à la surface ou à un câble de fibre optique [...]* ». Trois configurations d'observatoire peuvent être définies : autonome, à liaison acoustique ou câblé [Favali 06].

La première configuration, l'observatoire autonome, correspond à un observatoire sans liaison énergétique. L'alimentation en énergie des instruments s'effectue avec des batteries et l'autonomie dépend donc de leur capacité. Avec ce type d'observatoire, la quantité de données recueillies est limitée et ces dernières sont fournies à une station d'accueil de façon ponctuelle. Un des premiers observatoires autonomes a été SAMO (Station Abyssale de Mesures Océanographique), qui a été déployé par l'IFREMER en 1991 [Person 06].

Les données peuvent être transmises par des capsules de données capables de flotter, libérées périodiquement lors de la mission, et transmettant les informations une fois à la surface (Figure 1.3). Cette idée a été mise en œuvre dans le projet GEOSTAR avec les capsules Messengers « expendable » [Beranzoli 98]. Elles sont dédiées aux transmissions périodiques ou en cas d'urgence (défaillance de la station). Elles contiennent 32 kbits de

données, transmises de façon répétée pendant un mois en utilisant les satellites du réseau ARGOS, une fois la capsule à la surface. Les capsules Messengers « storing », qui peuvent contenir de 1 à 40 Mbits de données, sont libérées sur ordre acoustique. La capsule est ensuite récupérée par le navire ayant fait la requête et les données sont intégralement téléchargées.

Une liaison acoustique est un autre moyen de transmettre des données (ex : SAMO [Person 06], SN-1 [Favali 03] ou MABEL [Calcara 01]) : la station sous-marine enregistre des données sur une certaine durée et les envoie ensuite au navire de recherche venant récupérer ces enregistrements périodiquement (Figure 1.3). Dans le cas de la première mission de SN-1 (Submarine Network-1), la station enregistrerait environ 10 Gbits de données sur une période de 130 jours. Classiquement, dans les observatoires autonomes mis en place, on retrouve les capteurs suivants : sismomètre, gravimètre, magnétomètre, CTD (Conductivity Temperature Depth), courantomètre et des capteurs électrochimiques. La durée de vie d'une telle installation est typiquement d'un an.

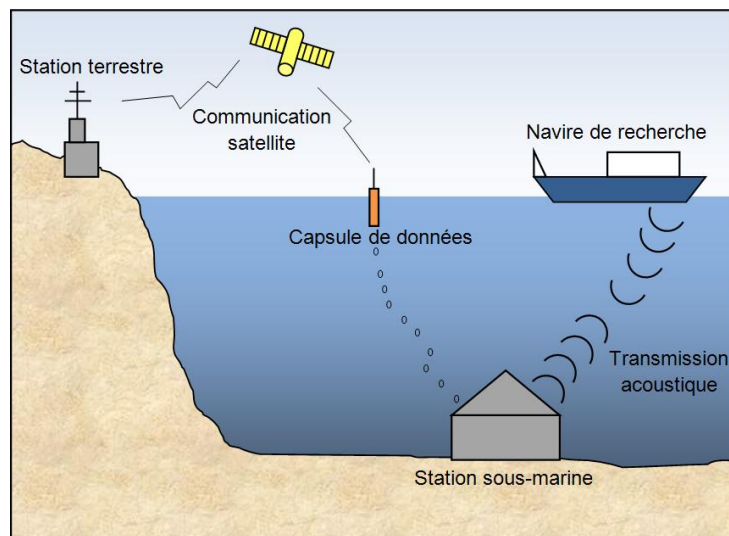


Figure 1.3 : Fonctionnement d'un observatoire autonome.

La deuxième configuration des observatoires de fond de mer est l'observatoire à liaison acoustique. Dans ce cas, la station sous-marine délivre les informations par liaison acoustique à une infrastructure telle qu'une bouée de mouillage ou à un autre observatoire comme un nœud d'un réseau sous-marin (ex : SAMO [Person 06], ASSEM [Blandin 03] et ORION-GEOSTAR-3 [Favali 06]). Les données ne sont pas stockées, mais sont transmises en continu à intervalle régulier.

Dans le premier cas, les données sont transmises par liaison acoustique de la station sous-marine vers une bouée à la surface, ancrée au fond marin (Figure 1.4). Cette dernière transfère ensuite les données via un satellite et/ou par liaison radio jusqu'à une station terrestre. La transmission est qualifiée de quasi temps réel. L'observatoire est alimenté par des batteries tandis que la bouée est alimentée par des panneaux solaires ou par une batterie. Il est difficile d'obtenir un système performant étant donné que l'alimentation, le débit du transfert et la stabilité de la bouée sont liées. De plus, le dispositif dispose en conséquence d'une énergie limitée. Cela implique d'utiliser une bande passante réduite pour la transmission des données. Le débit de transmission des données est généralement compris entre 1 kbit/s à 10 kbit/s.

Dans le second cas, les données sont transmises par liaison acoustique de la station vers un nœud d'un réseau sous-marin d'un autre observatoire. Les données sont ensuite transportées par câble vers la station terrestre (Figure 1.4). La durée de vie d'un tel observatoire est

estimée à environ douze mois, voire plus comme l'atteste l'utilisation de GEOSTAR-3 dont les mesures ont duré 477 jours [Beranzoli 09].

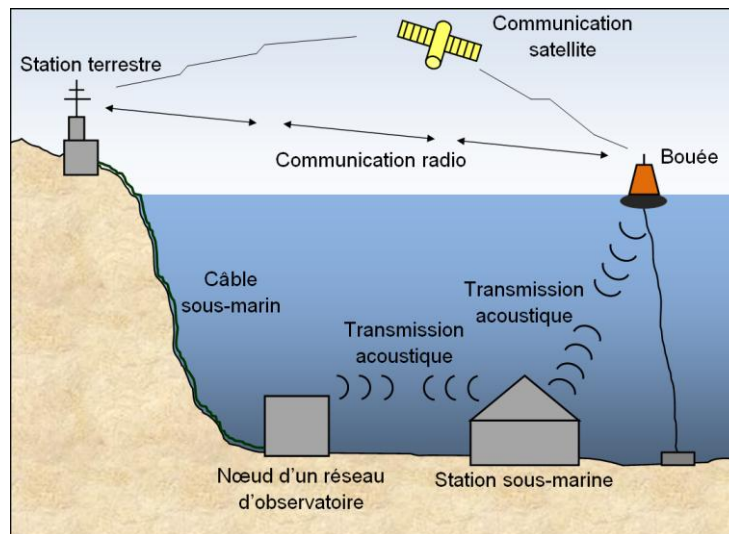


Figure 1.4 : Fonctionnement d'un observatoire à liaison acoustique.

Les performances de ces deux premières configurations d'observatoires sont limitées par les méthodes d'alimentation énergétique, la capacité et le débit des données mesurées à transmettre, et le délai pour les envoyer. Ce type d'observatoire ne permet pas d'obtenir des données en temps réel et sur des durées d'observation importantes, supérieures à un an. La troisième configuration, le réseau câblé, est quant à elle capable de réaliser des mesures en temps réel sans limite d'alimentation en énergie [Chave 04]. En effet, l'utilisation d'un câble permet de transmettre l'énergie, les paramètres de mesure et les données recueillies en continu.

L'observatoire câblé est composé généralement de la station terrestre, de câbles sous-marins, de nœuds, de boîtes de jonction, des instruments (Figure 1.5). La station terrestre transmet l'énergie et les commandes par le câble jusqu'aux nœuds du réseau. Ce câble contient des câbles en cuivre pour l'alimentation électrique et des fibres optiques pour les données. Les nœuds permettent de lier la station terrestre aux boîtes de jonction et aux instruments du réseau. Un nœud distribue l'énergie et les données aux boîtes de jonction appropriées. Le nœud reçoit les données issues des instruments et les transmet à la station terrestre. Il possède un régulateur de courant et des interfaces pour être relié aux boîtes de jonction via un câble sous-marin sur des réseaux de grande envergure. Les câbles permettent généralement de distribuer une dizaine de kilowatts, de transmettre des données avec un débit théorique de 500 Gbit/s à 1 Tbit/s, sur des longueurs pouvant atteindre plus de 800 km.

Cependant, le coût d'un tel observatoire est beaucoup plus important que celui de ceux mentionnés précédemment. Mais en tenant compte de leur durée de vie, estimé à 25 ans, et de la maintenance à opérer, A. Chave a estimé que le coût de 20 bouées, entretenues pendant 25 ans, est supérieur au coût d'un observatoire câblé constitué de 26 nœuds [Chave 04]. Cette estimation suppose que l'observation est réalisée dans une zone éloignée des côtes, où l'installation et la maintenance sont difficiles, surtout pour les bouées. De manière à réduire ce coût et notamment celui du déploiement d'un observatoire câblé, il est possible d'utiliser des câbles de télécommunications mis hors-service (ex : VENUS [Kawaguchi 98]). Nous nous proposons de détailler le développement des observatoires câblés dans la partie suivante.



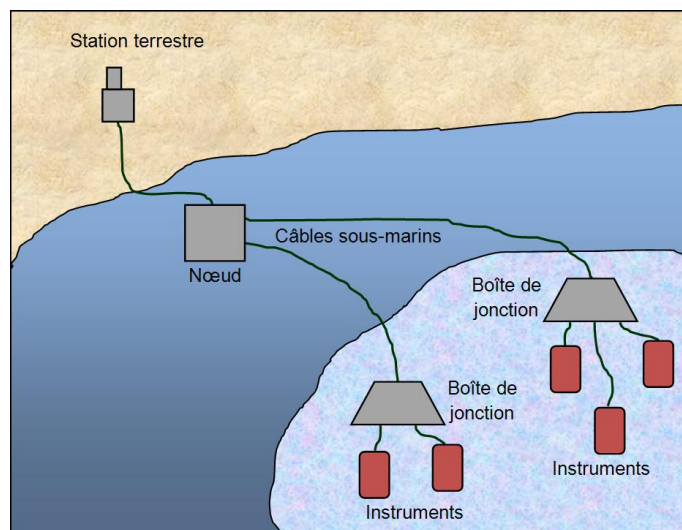


Figure 1.5 : Schéma d'un observatoire câblé.

### 1.1.3. Le développement des observatoires câblés de fond de mer

Nous allons maintenant présenter le développement et les progrès des observatoires câblés de fond de mer. Nous parlerons tout d'abord des premiers observatoires câblés. Puis nous présenterons leur évolution pour une étude multidisciplinaire et nous évoquerons les observatoires de grande envergure. Nous terminerons en exposant les observatoires câblés, pour lesquels des efforts ont été faits afin de réduire leurs coûts d'installation et de déploiement.

#### 1.1.3.a. Premiers observatoires câblés

Historiquement, le premier réseau câblé fut installé en novembre 1978 par la JMA (Japan Meteorological Agency). L'objectif était d'étudier les tremblements de terre pour la prévention de séismes et de tsunamis, étant donné que ces phénomènes sont courants au Japon. L'observatoire a été déployé dans la région de Tokai, qui fut le foyer d'une activité sismique en 1978. Il était constitué de quatre sismographes et d'une jauge de pression, répartis sur un câble long de 125 km (Figure 1.6) [Suyehiro 03, Joseph 11]. Cet observatoire, installé pour quelques années, n'était pas dédié à l'observation à long terme et ne pouvait pas supporter une grande quantité de capteurs.

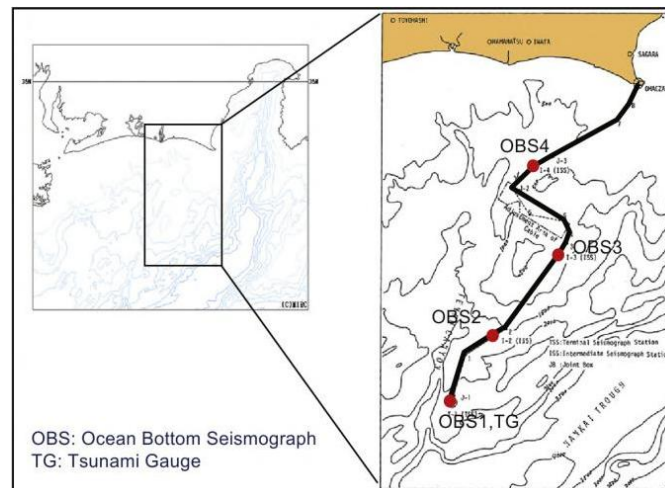


Figure 1.6 : Observatoire câblé de fond de mer constitué de sismomètres (OBS) et d'une jauge de pression (TG) installé par le JMA dans la région de Tokai pour la prévention de séismes et de tsunamis [Joseph 11].

Conscient de l'intérêt de ce type d'observatoire pour la prévention des séismes et des tsunamis, le Japon a développé et amélioré ses observatoires câblés. Ainsi, le JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and TEChnology) a introduit la première génération de réseaux d'observatoires câblés : le réseau multi-capteurs, c'est-à-dire qu'un instrument donné contient plusieurs capteurs. Le premier réseau a été installé en 1993 dans Sagami Bay, à 7 km de l'Île de Hatsushima. Il est équipé d'un câble électro-optique long de 10 km, à la place du câble co-axial employé auparavant. L'énergie est transmise sous forme électrique et les données le sont sous forme optique. L'observatoire sous-marin possède des instruments principalement dédiés à la sismologie : un sismomètre, un hydrophone, un thermomètre, une CTD (instrument pour la mesure de la conductivité, de la température et de la pression), une caméra vidéo, et un capteur de courant électromagnétique [Kasaya 09]. Il a réalisé des mesures en temps réel durant six ans et s'arrêta en 1999 à cause d'une panne due à un problème sur le câble sous-marin. Prenant exemple sur ce modèle, deux autres observatoires furent installés au Japon. Le second réseau d'observation câblé fut déployé en 1997, au large de Muroto, près de l'épicentre du tremblement de terre de Nankai de 1946, avec deux sismomètres et deux capteurs de pression (tsunami) le long d'un câble électro-optique de 120 km. Le troisième réseau fut installé au sud de Hokkaido en 1999 avec trois sismomètres et 3 capteurs de pression le long d'un câble électro-optique de 240 km sur la zone du tremblement de terre de Tokachi-Oki de 1952.

Des réseaux équivalents ont vu le jour aux États-Unis tels que LEO-15 (Long-term Ecosystem Observatory at 15 m). Il s'agissait d'un réseau câblé installé en 1996, constitué de deux nœuds situés à 8,1 km et à 9,6 km de Tuckerton au New Jersey, à 15 m de profondeur. Il fournissait des informations d'ordre biologique concernant les communautés benthiques et le phytoplancton [Creed 05]. Le second nœud fut ajouté en 2003. Un câble électro-optique reliait la station terrestre aux nœuds. Les données furent collectées en temps réel durant une dizaine d'années avant que l'observatoire soit remis à jour à partir de 2005 [Creed 05]. La remise à jour concernait l'adaptation du protocole de communication pour y connecter de nouveaux instruments.

### 1.1.3.b. Observatoires câblés multidisciplinaires

Les premiers réseaux ont rapidement trouvé un intérêt dans de nombreux domaines scientifiques, amenant aux systèmes de seconde génération : les réseaux d'observatoires

multi-disciplinaires. Le réseau de Hatsushima fut rénové en 2000 dans ce cadre [Kasaya 09]. Ce système accueille, en plus des précédents capteurs, une jauge de pression de précision (pour la détection de tsunami), un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) et un spectromètre à rayon gamma. Certains des anciens capteurs ont subi des améliorations et le réseau est désormais adaptable de par l'installation de connecteurs sous-marins, résolvant le problème apparu lors de la panne en 1999 : un défaut d'isolement. Des capteurs de fond de mer supplémentaires furent ajoutés en 2005 sur cet observatoire situé à 1175 m de profondeur : un électro-magnétomètre, une jauge de pression de précision et un gravimètre (Figure 1.7). Ce réseau japonais fournit également des informations pour l'océanographie et la biologie. De plus, les données recueillies peuvent être consultées sur un site Internet [Kasaya 09].

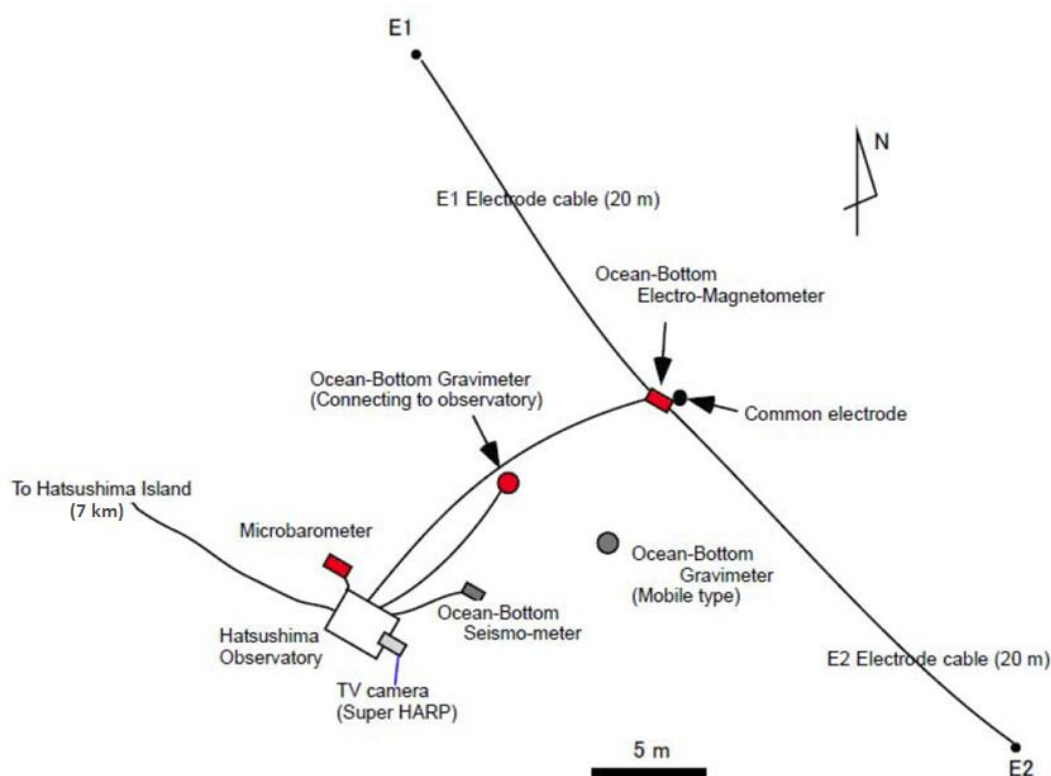


Figure 1.7 : Carte schématique de l'observatoire de Hatsushima en 2005 [Kasaya 09].

Un observatoire similaire fut installé en 1997 à 30 km de l'île d'Hawaii, à 1000 m de profondeur et appelé HUGO (Hawaii Undersea Geo-Observatory) [Duennebier 02]. Cet observatoire a pour but principal d'étudier le volcan Loihi. Il fournit également des informations pour la recherche en océanographie physique, en biologie, en géochimie et en géo-acoustique [Duennebier 02]. Il fut conçu pour accepter d'autres instruments. La station terrestre localisée à Honuapo fournit l'énergie, transmet les commandes et réceptionne les données, qui peuvent être mises en ligne sur Internet. Un câble électro-optique long de 47 km connecte la station terrestre à une boîte de jonction. Cette dernière régule la puissance électrique, transmet les mesures vers la station et distribue les commandes vers les différents nœuds. Ces nœuds, connectés aux instruments, réalisent une fonction analogue à la boîte de jonction (Figure 1.8). Cet observatoire a fourni d'excellents résultats avant que le câble ne subisse un court circuit en avril 1998. En 2002, l'étude du coût de la rénovation montra que, malgré l'évolution des technologies, le coût demeurait bien trop important pour envisager cette rénovation.



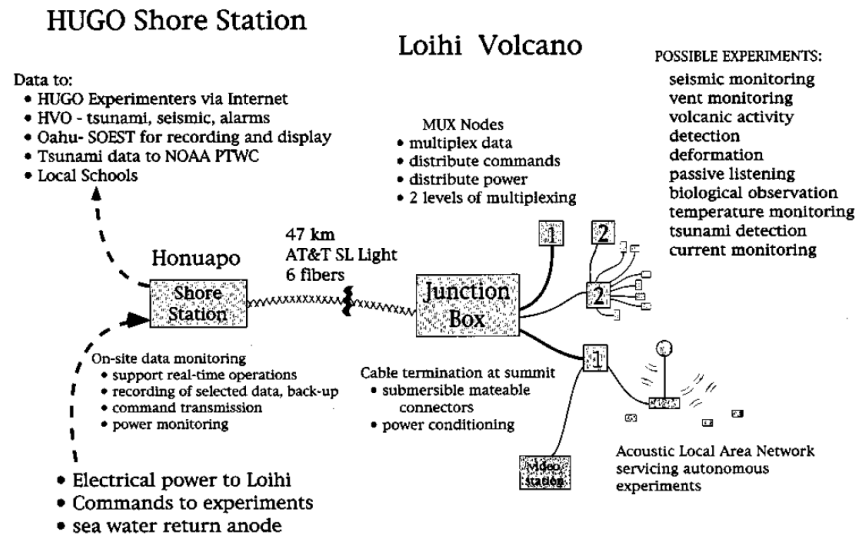


Figure 1.8 : Schéma fonctionnel de l'observatoire HUGO [Duennebie 02].

Les observatoires opérationnels ne se concentrent pas uniquement au Japon. L'observatoire VENUS (Victoria Experimental Network Under the Sea) est le premier observatoire câblé multidisciplinaire directement connectés à une station terrestre, dont l'architecture permet la connexion de plusieurs nœuds. Il a été déployé dans Saanich Inlet, au sud de l'île de Vancouver en 2006, et dans le Strait of Georgia près de Victoria (en Colombie Britannique) en 2008 (Figure 1.9(a)) [Woodroffe 08]. Il concerne principalement le domaine de la recherche océanographique le long des côtes. Les câbles déployés sont des câbles électro-optiques. Celui déployé à Saanich Inlet mesure 3 km et celui de Strait of Georgia est long de 40 km. L'observatoire est composé de la station terrestre, du câble, des nœuds, de boîtes de jonction (appelées SIIM dans le projet) et des instruments (Figure 1.9(b)). La ligne de Saanich Inlet contient un nœud, tandis que la ligne de Strait of Georgia en contient deux. Ces nœuds sont construits spécifiquement pour cette architecture pour se connecter au câble disponible, car leur conception dépend de la pression et de la profondeur d'installation. La durée de vie prévue de l'observatoire est de 25 ans. Il est possible d'ajouter des instruments car chaque nœud possède 6 connecteurs.

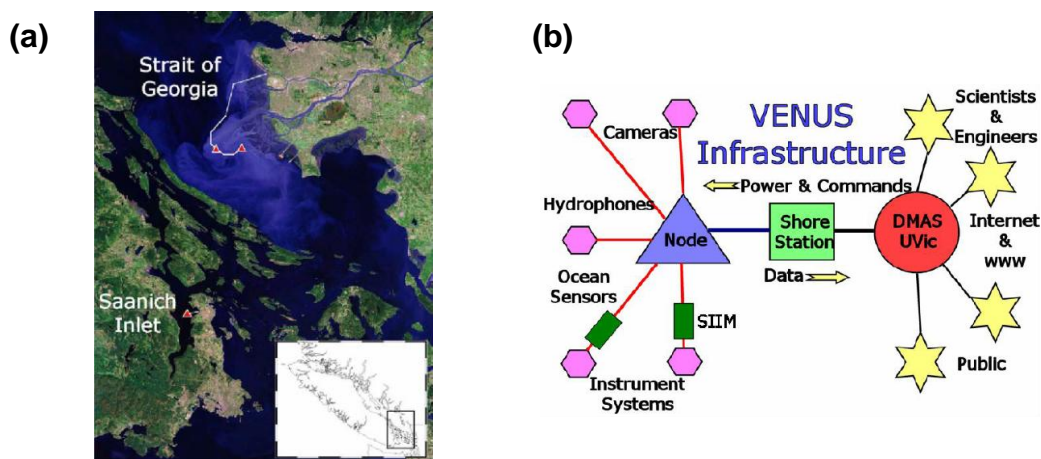


Figure 1.9 : (a) Localisation des deux lignes de l'observatoire VENUS et (b) Architecture générale composée d'un nœud [Dewey 07].

Un observatoire comparable à VENUS, nommé MARS (Monterey Accelerated Research System), fut installé dans la Monterey Bay aux États-Unis entre 2007 et 2008 [MBARI 09]. L'observatoire comprend un câble électro-optique long de 52 km, reliant la station terrestre du MBARI (Monterey Bay Aquarium Research Institute) et le nœud de MARS, à une profondeur de 891 m (Figure 1.10). Il permet de réaliser des mesures dans les domaines de la géologie, l'océanographie physique et la biologie. Sept stations d'observations ont été connectées au nœud jusqu'à aujourd'hui.

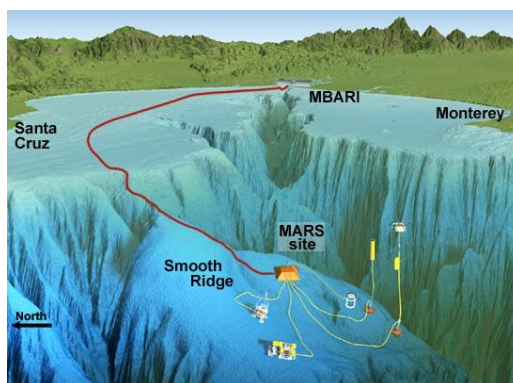


Figure 1.10 : Représentation de l'observatoire MARS situé dans la Monterey Bay [MBARI 09].

La majorité des observatoires sous-marins est dédiée à l'étude de l'environnement marin ou se concentre sur les phénomènes géologiques. Il existe une catégorie différente de capteurs qui doit être placée en milieu sous-marin : les télescopes à Neutrino. Le fait d'immerger un tel télescope améliore les performances de détection en comparaison d'un télescope similaire placé dans l'atmosphère [Bertin 98]. ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch) est un projet collaboratif dédié à l'installation du plus grand télescope à Neutrino dans l'hémisphère Nord, localisé à 40 km de Toulon [Ardid 07]. Le télescope est formé de douze lignes, toutes reliées à une boîte de jonction. Cette boîte de jonction est reliée à une station terrestre avec un câble électro-optique long de 42 km. Le déploiement de la boîte de jonction et des lignes a débuté en 2002. La durée de vie prévue d'un tel équipement est de dix ans.

### 1.1.3.c. Réseaux câblés de grande envergure

La réussite d'observatoires côtiers tels que VENUS, LEO-15 ou MARS a montré que la mise en place d'observatoires câblés est maîtrisée, notamment grâce à la disponibilité des technologies sous-marines (nœud, câble, connecteurs, boîte de jonction). La volonté de réaliser des mesures multidisciplinaires dans des grandes zones (quelques 10 000 km<sup>2</sup> à quelques 100 000 km<sup>2</sup>) a conduit à l'élaboration de réseaux d'observatoires câblés de grande envergure et à long terme (Figure 1.11). Pour les concevoir, il est généralement nécessaire de déployer de nouveaux observatoires. Mais il est possible d'intégrer les observatoires à des réseaux existants [Favali 10].

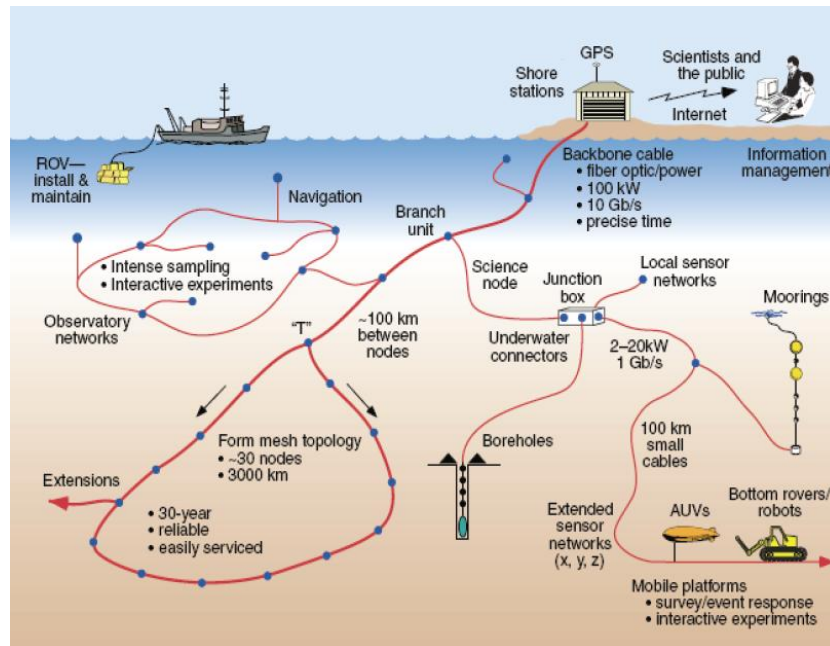


Figure 1.11 : Concept d'un observatoire câblé de grande envergure [Favali 10].

Le réseau câblé NEPTUNE (North-East Pacific Time-series Undersea Networked Experiments) est un réseau d'observatoires de grande envergure et le premier au monde dans ce domaine. Il s'agit d'un projet collaboratif entre le Canada et les États-Unis, localisé sur la plaque tectonique de Juan De Fuca [Phibbs 07]. Il est considéré comme le projet frère de VENUS car la plupart des composants de NEPTUNE ont été testés sur VENUS. Un des objectifs de ce réseau est de créer une grande plateforme de recherches multidisciplinaires, connectée à Internet. Les études réalisées concernent : la sismologie, la géodynamique, le flux de particules des marges de la plaque, l'hydrogéologie et la biogéochimie des fonds marin, les processus de la zone de subduction et de la dorsale, l'écologie des fonds marins, les courants marins, et la faune marine. Il est composé d'un câble électro-optique, long de 825 km, déployé en boucle autour de la plaque tectonique afin de surveiller six sites d'intérêts scientifiques, avec la possibilité d'installer six nœuds (cinq sont installés pour le moment). Il débute et termine à Port Alberni (Colombie Britannique, Canada) avec une station terrestre (Figure 1.12). La durée de vie prévue est de 25 ans ou plus [Barnes 11]. De même que pour VENUS, il est possible d'étendre le réseau pour y ajouter des instruments.

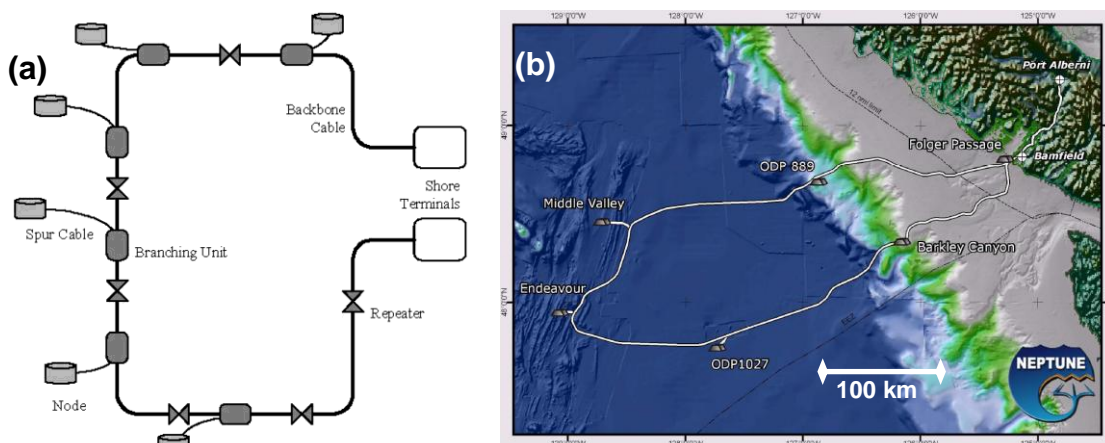


Figure 1.12 : (a) Représentation schématique du réseau NEPTUNE et (b) sa localisation géographique [Phibbs 07].

Le Japon possède également des projets de grande envergure. Nous pouvons citer le réseau câblé d'observatoire DONET (Dense Ocean floor NETwork system), installé à partir de 2006 [Kawaguchi 07] par le JAMSTEC. Il est déployé au sud-ouest du Japon, dans la mer des Philippines, autour de la zone sismique de Tonankai. Le réseau DONET a pour objectif de surveiller l'apparition de séismes et de tsunamis, et les mouvements de croûte des fonds marins. Il est composé d'un câble électro-optique long de 300 km, équipé de répéteurs et d'unités de branchements. Cinq nœuds, pouvant accueillir 8 capteurs chacun, connectent le câble aux vingt instruments, espacés de 15 à 20 km (Figure 1.13). Un second réseau, DONET2, fut déployé à partir de 2010 afin de surveiller entièrement la zone près de la faille de Nankai [Kaneda 10]. Il peut accueillir cent instruments au maximum et le câble est long de 1000 km. Ces deux réseaux ont une durée de vie prévue de 20 à 30 ans.

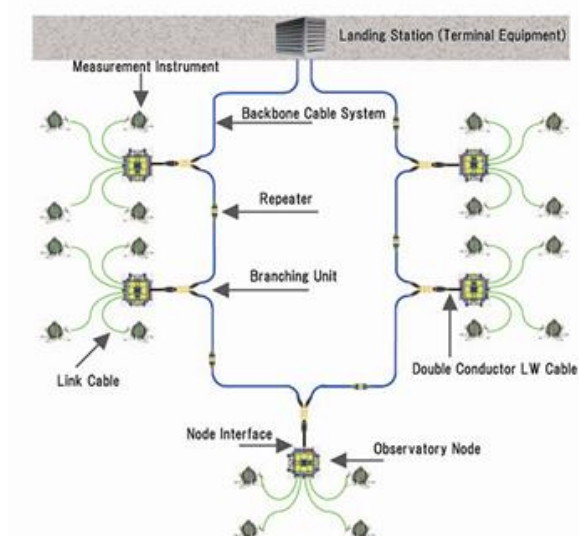


Figure 1.13 : Schéma de concept de DONET [Kawaguchi 07].

Enfin, nous devons citer le projet ESONET-NoE (European Seafloor Observatory NETwork – Network of Excellence), mis en place en 2002, piloté par IFREMER, et réunissant quatorze pays européens et cinquante partenaires afin de définir les zones d'intérêt scientifique et les moyens d'observation souhaités pour parvenir au suivi de ces zones [Person 07]. Les objectifs scientifiques concernent les domaines de l'océanographie Physique et le changement global, les sciences de la Terre, les risques géologiques, l'écosystème marin et les ressources fossiles. Onze sites ont été retenus sur les côtes européennes pour y réaliser des observations. Pour l'instant, ESONET s'appuie sur des missions de démonstration sur quatre sites [Favali 10]. Par exemple, SN-1 est l'un des observatoires testés dans ce projet.

ESONET a été suivi du projet EMSO (European Multidisciplinary Seafloor Observatory), dont la phase préparatoire a débuté en 2008 [Favali 11]. EMSO est décrit comme une infrastructure de recherche à grande échelle, dont l'objectif est de rédiger le cahier des charges pour la mise en place d'observatoires câblés de fond de mer, de mettre en œuvre des moyens de surveillance en temps réel, et à long terme les processus environnementaux dans les mers européennes (Figure 1.14). EMSO propose le développement de plusieurs observatoires séparés et répartis, en 2011, sur onze sites [IFREMER 12]. Les informations collectées permettent ainsi de renseigner les scientifiques sur les phénomènes autour de l'Europe.





Figure 1.14 : Carte des emplacements des nœuds de EMSO/ESONET [Favali 11].

Les réseaux de grande envergure permettent ainsi de répondre à de nombreuses problématiques scientifiques, et nécessitent également un important budget. Dans la suite, nous allons nous intéresser aux moyens entrepris pour réduire le coût de développement et de déploiement des observatoires.

#### 1.1.3.d. Observatoires câblés et réduction de coût

Il est important de noter que le coût des câbles, de leur pose par des navires câbliers, le coût du matériel de connexion et la maintenance du réseau peuvent devenir prohibitifs (3 M€ par 100 km de câble posé [Shirasaki 03]). Les projets présentés précédemment ont pu être réalisés car un budget important leur a été alloué. Cependant, afin de limiter les coûts, et notamment celui du câble et de son déploiement, plusieurs moyens sont possibles :

- réutiliser des câbles existants et déployés dans la zone d'observation souhaitée ;
- mutualiser un câble pour plusieurs observatoires ;
- réduire le coût de développement et de déploiement des câbles.

Le premier cas consiste à récupérer des câbles de télécommunications actuellement inutilisés [Shirasaki 03]. C'est le cas des projets japonais GeO-TOC (Geophysical and Oceanographic Trans Ocean Cable) [Kasahara 98] et VENUS (Versatile Eco-monitoring Network by Undersea-cable System) [Kawaguchi 98]. Le premier, un observatoire sismologique, fut installé en 1997 à Izu-Bonin en utilisant le câble de télécommunications transpacifique situé entre Ninomiya et Guam, long de 2700 km [Kasahara 98]. Le second, un observatoire multi-disciplinaire, fut déployé en 1999 dans la fosse de Ryukyu et emploie le câble de télécommunications transpacifique long de 2500 km [Kasahara 00]. La boîte de jonction est reliée à différents instruments, dédiés à la prévention des séismes et des tsunamis. Le réseau câblé VENUS contient six stations d'observations sous-marines et est plus récent que GeO-TOC. Ce dernier observatoire a cessé de fonctionner en 2002 [Kasahara 06]. Ces observatoires montrent l'utilité de la récupération de câbles de télécommunications hors-service.

Toujours dans le but de réduire les coûts, le câble installé peut être mutualisé entre deux observatoires. Nous pouvons citer l'observatoire SN-1, qui était auparavant un observatoire autonome opérant en 2002-2003. À l'issue de ce premier déploiement, il fut à nouveau installé dans le même site (à environ 25 km à l'Est de l'Etna à 206 m de profondeur) en

janvier 2005 et connecté à un câble long d'environ 25 km, appartenant au laboratoire INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare : Institut National italien de Physique Nucléaire) [Favali 06]. Ce câble est également utilisé dans le cadre de l'observatoire NEMO (NEutrino Mediterranean Observatory) déployé par l'INFN et dédié à une expérience scientifique de détection de neutrinos dans les fonds marins (Figure 1.15) [Favali 06].

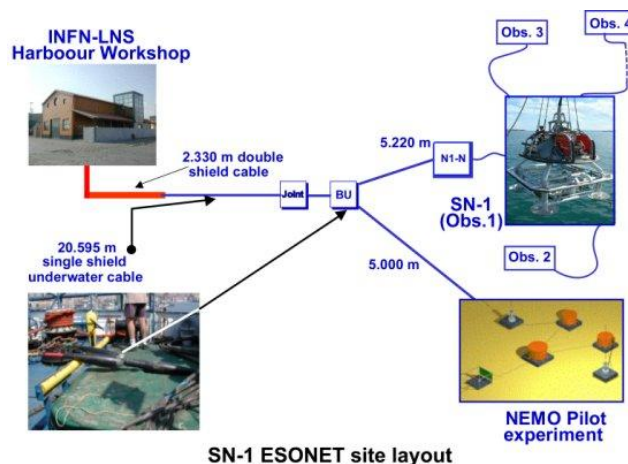


Figure 1.15 : Architecture du réseau SN-1 - NEMO [Oceanlab 02].

Des réseaux peu onéreux et peu consommateurs sont également à l'étude même s'ils sont moins performants. Par exemple, les capteurs peuvent être alimentés par batteries et peuvent être réveillés sur commande. Le projet Deep Sea Net est un exemple d'un tel réseau. Il est consacré à l'étude d'une solution compacte et simple pour déployer des câbles, et dédié à des observatoires de fond de mer de surveillance à long terme [Valdy 07a]. Il propose une solution alternative pour l'installation, la maintenance et l'expansion à un prix abordable. L'étude est centrée sur le développement et l'industrialisation d'un micro câble de fibre optique, et de nœuds spécifiques communiquant avec le protocole Internet (IP). Les objectifs pour améliorer le déploiement de ce réseau câblé concernent le choix du câble, le système de déploiement, et l'élaboration de connecteurs imperméables. Un prototype doit être connecté sur la boîte de jonction d'ANTARES (Figure 1.16). Le réseau est composé d'un micro-câble long de 50 km connectant les nœuds à la boîte de jonction. Chaque nœud, possédant six connecteurs sous-marins, est alimenté avec six piles au Lithium, permettant d'avoir dix ans d'autonomie avec un quart d'heure de communication par jour. Ces nœuds et le micro câble, de par leur poids, peuvent être déployés avec un ROV [Valdy 07b].

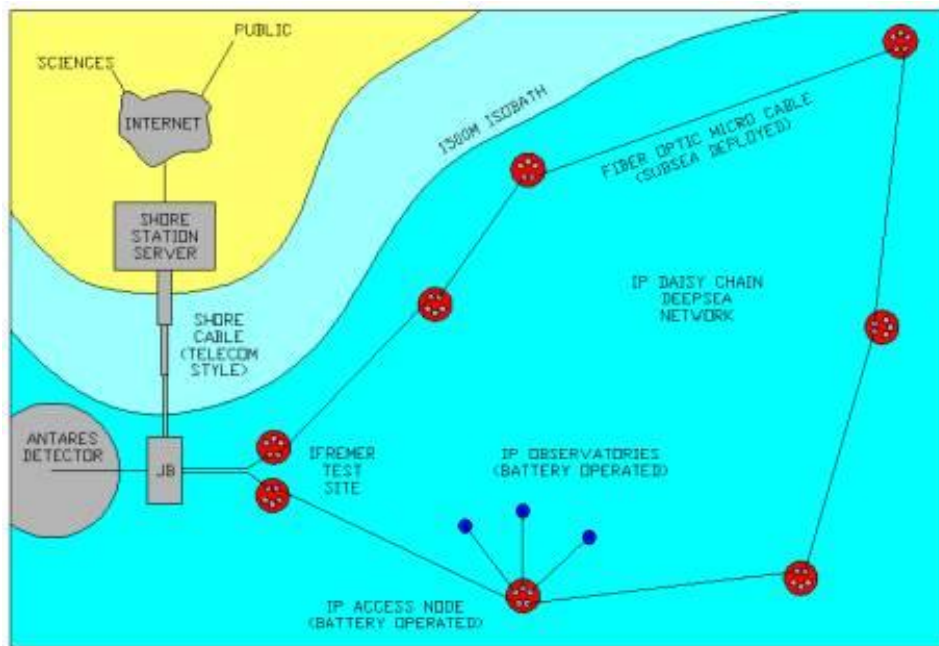


Figure 1.16 : Schéma du réseau Deep Sea Net [Valdy 07a].

Malgré les progrès technologiques réalisés lors des dernières années pour développer des observatoires câblés de fond de mer, permettant d'étudier des phénomènes sous-marins à long terme et en temps réel, un inconvénient majeur demeure : ils sont très difficiles à relocaliser et à étendre dans le but d'explorer une zone proche présentant un intérêt spécifique. Il est donc nécessaire de chercher des solutions pour les étendre facilement avec flexibilité et à moindre coût.

#### 1.1.4. Projet opto-alimentation : étendre un réseau câblé

Le projet opto-alimentation que nous proposons, consiste à étudier et à développer l'extension câblée tout-optique d'un réseau, permettant de transporter l'énergie et les données en temps réel sur des fibres optiques vers des instruments distants. Le remplacement d'un câble électro-optique par un câble à une ou plusieurs fibres optiques présente de nombreux avantages. Tout d'abord, le câble à fibres optiques est moins lourd et surtout moins coûteux qu'un câble électro-optique. Le câble à fibres optiques pourra être déployé à l'aide d'un ROV, qui effectuera les connexions au niveau de la boîte de jonction, tandis que le dépôt de câbles électro-optiques nécessite l'emploi d'un navire câblé. Dans le cadre de cette application, nous pouvons profiter de l'immunité aux perturbations électromagnétiques de la fibre optique. Nous pourrions également connecter aisément des capteurs à fibre optique, sans nécessiter une conversion électrique. Dans ce cas, la fibre est l'élément sensible du capteur et le phénomène physique que l'on souhaite mesurer, soit engendre la génération d'une onde lumineuse, soit modifie les propriétés d'une onde lumineuse qui se propage dans la fibre [Ferdinand 92].

La Figure 1.17 détaille l'architecture d'une extension tout-optique reliée à un réseau câblé de fond de mer déjà existant. Les boîtes de jonction sont raccordées à la station terrestre par des liaisons optiques et électriques. La station terrestre fournit l'énergie d'alimentation sous forme électrique et transmet les données sous forme optique. L'extension du réseau est raccordée à l'une de ces boîtes de jonction. Nous décomposons l'architecture proposée en trois parties : l'interface BJ (Boîte de Jonction), le support de transmission et le terminal.

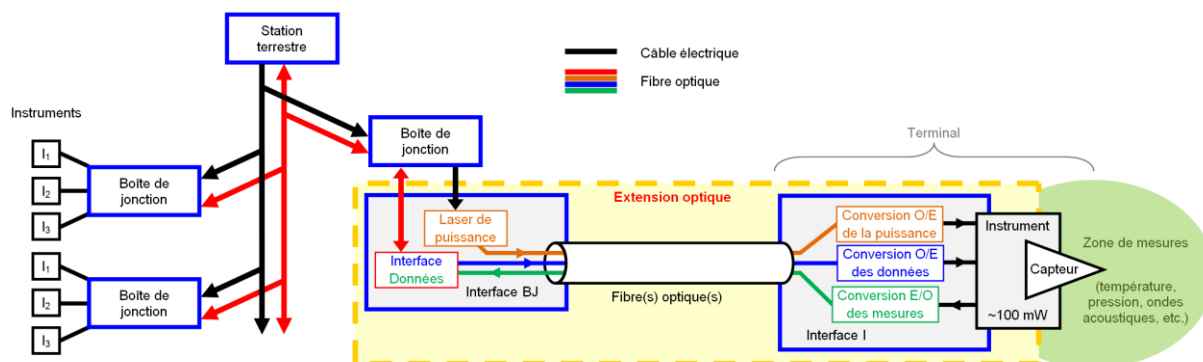


Figure 1.17 : Architecture de l'extension tout-optique connectée à un observatoire de fond de mer.

L'interface BJ a pour but d'adapter la liaison entre le réseau câblé existant et l'extension tout-optique développée au cours de ce travail. L'énergie électrique est convertie en énergie optique par une SLHP (Source Laser de Haute Puissance) et est ensuite acheminée jusqu'à l'instrument. De plus, une interface électronique gère les données montantes et descendantes ainsi que les protocoles de communication utilisés.

Le support de transmission est une fibre optique. Elle transporte l'énergie et les données échangées entre la station terrestre et l'instrument. Il peut également s'agir d'un câble contenant plusieurs fibres optiques pour transporter chaque voie optique sur un support différent, ou pour permettre la transmission de davantage de puissance et/ou de signaux.

Le terminal se situe à l'extrémité de la fibre optique et est constitué de l'instrument et de son interface I (Instrument). L'interface I réalise la conversion O/E (Optique/Électrique) de l'énergie d'alimentation et des données descendantes. La communication devant être bidirectionnelle, l'interface est également dotée d'un module de conversion E/O (Électro/Optique) pour transmettre les données montantes. L'instrument reçoit les instructions de commande et réalise les mesures correspondantes. Une interface électronique pourra être ajoutée dans l'interface I pour assurer une liaison générale avec plusieurs instruments utilisés couramment dans ce type d'observatoires.

La transmission de données sur fibre optique est une technique bien maîtrisée. Par contre, la transmission de la puissance sous forme optique est un sujet moins connu. Nous devons donc nous intéresser de plus près aux travaux réalisés dans le domaine de la puissance sur fibre afin d'en tirer bénéfice pour réaliser au mieux l'extension tout-optique.



## 1.2. Puissance sur fibre optique

Le transport de la puissance par fibre optique n'est pas un sujet nouveau et a connu un regain d'intérêt depuis le développement de nouvelles SLHP (Source Laser de Haute Puissance) pouvant émettre plus d'une centaine de milliwatts à quelques dizaine de watts en continu. Un état de l'art de cette technologie permet de constater son évolution et nous permet de positionner nos choix pour la réalisation de notre extension par rapport aux différents cas étudiés.

### 1.2.1. Présentation de la puissance sur fibre

La puissance sur fibre, appelée aussi alimentation photonique ou opto-alimentation, consiste en un système composé d'une source laser, d'un module de conversion O/E (composé d'une cellule photovoltaïque) et de la fibre optique comme support de transmission (Figure 1.18) [Werthen 06]. L'énergie est transmise sous forme optique par la source laser dans la fibre optique. La cellule photovoltaïque collecte l'énergie pour alimenter électriquement un instrument. La technologie du multiplexage en longueur d'onde (WDM : Wavelength Division Multiplexing) permet de transmettre les données et l'énergie sur la même fibre optique, réduisant ainsi le nombre de connexions [Miyakawa 06].

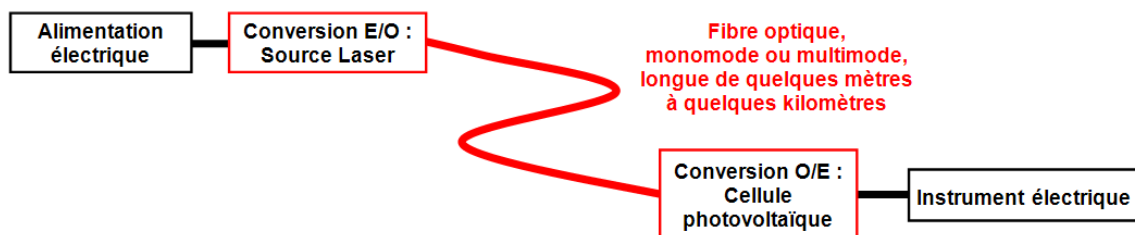


Figure 1.18 : Schéma général d'un dispositif de puissance sur fibre.

L'intérêt de la fibre optique pour la transmission de données à haut débit sur de grandes distances est bien connu [Joindot 96]. Comme exemple, nous pouvons citer le remplacement des câbles coaxiaux par des fibres optiques pour les communications intercontinentales. Par contre, les avantages que peut présenter la fibre optique dans le transport de l'alimentation en énergie le sont moins. Nous proposons donc de détailler l'intérêt d'utiliser de la puissance sur fibre.

Les avantages de la fibre optique par rapport aux câbles électriques, utilisés couramment pour l'alimentation en énergie, sont les suivants [Werthen 05] :

- la fibre optique classique en silice (SMF-28 par exemple) a une atténuation minimale de l'ordre de 0,2 dB/km, tandis que l'atténuation d'un câble en cuivre, utilisé en télécommunications, est de l'ordre de 10 dB/km dans le cas d'un courant continu [General Cable 12]. L'énergie sera donc beaucoup moins atténuée par transmission optique sur de longues distances. La faible atténuation de la fibre permet de s'affranchir de répéteurs, nécessaires sur les câbles électriques pour amplifier le signal ;
- la fibre optique classique est moins coûteuse qu'un câble électrique. Les recherches réalisées dans le cadre du projet Deep Sea Net ont montré qu'un câble électro-optique coûte dix fois plus cher qu'une fibre optique [Valdy 07a] ;
- elle possède une grande capacité de transmission et peut supporter un grand débit d'informations ;

- elle dégrade peu le signal, et tire avantage de son immunité aux champs électromagnétiques et radio-fréquences (RF), et de son isolation galvanique dans certaines applications. Elle possède aussi l'avantage de la sécurité car elle ne risque pas de provoquer des incidents liés aux courts-circuits et peut donc être utilisée dans des environnements hostiles ;
- elle est mince et légère, car la fibre optique n'a pas besoin d'être protégée des perturbations électromagnétiques. Cela offre une plus grande flexibilité pour son déploiement par rapport à un câble électrique.

Aujourd'hui, la puissance sur fibre est utilisée pour de nombreuses applications industrielles [Werthen 05] et exploitée dans divers domaines tels que la médecine, l'aérospatiale, les télécommunications, l'aéronautique, la recherche scientifique et la prévention. Afin de détailler ce mode prometteur d'alimentation, nous proposons dans la suite un état de l'art sur cette technologie. Celui-ci nous aidera à concevoir notre architecture.

### 1.2.2. État de l'art de la puissance sur fibre

Nous exposons tout d'abord l'évolution de cette technologie depuis les premières recherches menées dans le domaine. Nous nous intéressons également aux premiers réseaux de capteurs opto-alimentés. Puis, nous présentons les applications récentes. Dans chaque cas, nous nous appuyons sur des exemples.

#### 1.2.2.a. Les premières recherches de la puissance sur fibre

La première expérience d'opto-alimentation fut réalisée par Bell Labs en 1978 et consistait à alimenter une sonnerie de téléphone [DeLoach 78]. La faisabilité a été montrée à l'aide d'un démonstrateur (Figure 1.19).

La source optique, un laser AlGaAs (Arséniure de Gallium-Aluminium), transmet l'onde optique à 801 nm, dans une fibre optique longue de quelques mètres possédant des pertes de 6 dB/km. L'onde en sortie de la fibre optique a une puissance de 5,95 mW, et est dirigée à l'air libre vers une cellule photovoltaïque en AlGaAs, qui fournit 3,1 mW électrique (soit un rendement de conversion O/E de 52%). L'onde optique modulée correspond à la modulation de la sonnerie.

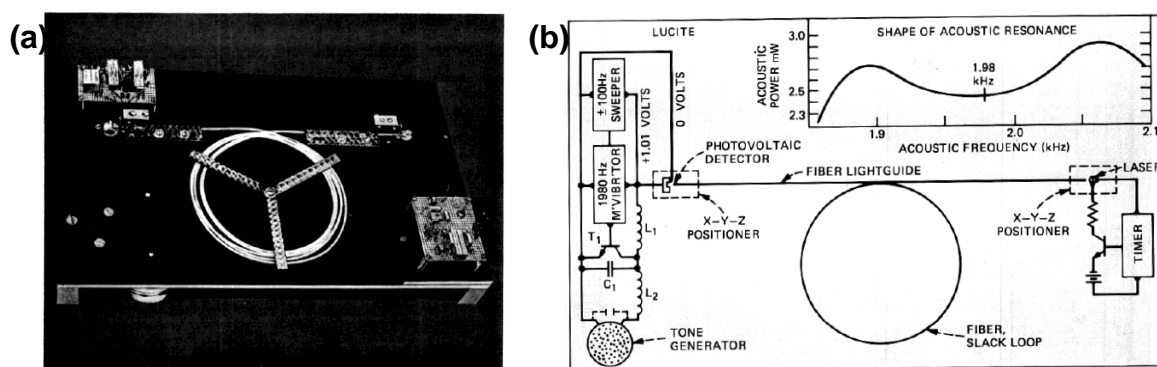


Figure 1.19 : (a) Photographie et (b) schéma du démonstrateur de la sonnerie de téléphone opto-alimenté [DeLoach 78].

Dans les années suivantes, le laboratoire Bell Labs a continué ces expériences en exploitant la même architecture de base avec une source laser émettant quelques milliwatts



Ces expériences furent uniquement réalisées en laboratoire et n'ont trouvé que peu d'intérêt pratique, en raison du peu d'énergie électrique disponible. À cette période, les sources lasers délivraient un signal de relativement faible puissance (du point de vue de la puissance sur fibre) autour de 800 nm, et la fibre optique employée engendrait beaucoup d'atténuation. La puissance électrique recueillie était alors inférieure à 1 mW. La conversion O/E était réalisée avec des cellules en AlGaAs, disponibles uniquement en laboratoire, et qui offraient un rendement supérieur à celui des cellules en Si utilisées couramment dans les applications de conversion photovoltaïque.

Malgré la faible puissance électrique délivrée par les premiers systèmes d'opto-alimentation, cette technologie a connu un intérêt particulier de par l'immunité de la fibre optique aux champs électromagnétiques et à son utilisation possible en milieu hostile. Pour illustrer cette possibilité, on peut citer la première application pratique de la puissance sur fibre présentée par M. Adolfsson en 1989 (Figure 1.22) [Adolfsson 89]. Il s'agissait d'un transducteur de courant opto-alimenté pour la mesure du courant sur des lignes à haute tension.

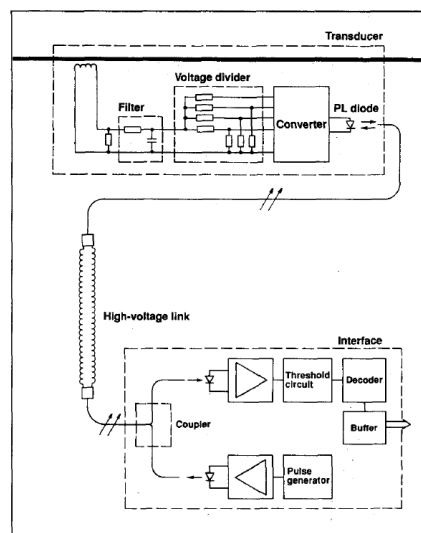


Figure 1.22 : Schéma du dispositif opto-alimenté du transducteur de courant électrique [Adolfsson 89].

De nombreux autres travaux d'opto-alimentation peuvent être cités, utilisant des sources laser continues [Kirkham 89, Tamura 91], pulsées [Feng 98] ou modulées [Schweizer 87], pour piloter des capteurs conventionnels, des accéléromètres, des capteurs de pression ou de courant. Il existe également un dispositif opto-alimenté créé pour le contrôle de position angulaire pour le palonnier d'un hélicoptère [Neveux 90]. Pour toutes ces applications, la puissance au niveau des instruments reste faible et n'excède pas les 10 mW. De plus la longueur de la fibre multimode reste dans la majorité des cas inférieure à la centaine de mètres. Ces travaux ont permis d'envisager la conception d'un réseau fibré de capteurs opto-alimentés.

Mais, avant de discuter des réseaux opto-alimentés, on se doit de mentionner la première démonstration de transmission qualifiée de haute puissance, c'est-à-dire capable de fournir une centaine de milliwatts électriques au niveau de l'instrument. Le dispositif, mis en place par R. Pena à la fin des années 90 utilise un laser émettant 750 mW à 809 nm et permet d'obtenir après un parcours de 100 m sur une fibre multimode une puissance électrique de 205 mW [Pena 99]. Le module opto-alimenté est composé de cinq circuits électroniques basse

consommation, chacun étant relié à un capteur : température, humidité, pression, intensité lumineuse et intrusion. Un microcontrôleur, relié à un bus de communication gère les informations des capteurs. Les données sont envoyées via une DEL dans une seconde fibre optique identique à la première (Figure 1.23). Il est envisagé de poursuivre le travail en transmettant à la fois des commandes et les données des capteurs dans une fibre multimode, puis de transmettre les trois ondes (puissance, commandes, données) dans une seule fibre optique.

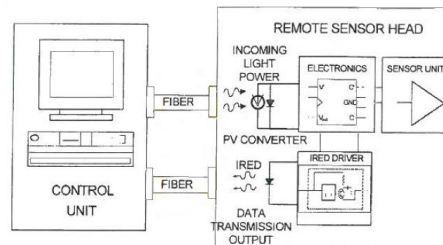


Figure 1.23 : Schéma du dispositif d'opto-alimentation délivrant 205 mW électrique à 100 m [Pena 99].

### 1.2.2.b. Réseau de capteurs opto-alimentés

Les applications présentées précédemment ont montré que la puissance sur fibre est une technologie envisageable dans le domaine de la mesure, et ont mis en avant les avantages de l'opto-alimentation. Il est donc facile d'envisager de construire des réseaux de capteurs opto-alimentés, basés sur les dispositifs précédents. Nous proposons ici quelques exemples.

La société Spectec a ainsi développé un réseau bidirectionnel en anneau de capteurs opto-alimentés (Figure 1.24). Le réseau est basé sur une fibre optique en boucle, connectée à plusieurs postes (quatre ou cinq), chacun pouvant être raccordé à huit transducteurs (capteurs de température, de présence ou de déplacement) [Neveux 91]. La puissance et les informations se propagent dans les deux sens dans la boucle. D'une part, chaque capteur reçoit la même alimentation car il recueille la somme de l'énergie provenant de chaque côté. D'autre part, si une partie de la boucle est coupée, la puissance et les informations continueront d'être transmises dans un seul sens avec une certaine atténuation en fonction de la distance de propagation. Dans le cas de quatre postes opto-alimentés sur la boucle, où chacun contrôle un transducteur, et pour une puissance laser émise de 65 mW de chaque côté, un poste reçoit 190  $\mu$ W de puissance électrique. Cette puissance est disponible pour l'électronique embarquée, l'échantillonnage et la transmission des données par une DEL. Cela limite la vitesse de propagation des données à 30 Hz. Cette boucle a été mise en pratique, avec succès en utilisant deux diodes laser de puissance de 100 mW à 800 nm, des cellules photovoltaïques dont le rendement de conversion atteint 40%, et des diodes laser émettant 20 mW à 820 nm pour le retour des informations. Le dispositif final est constitué d'une fibre optique multimode longue de 100 m, connectée à quatre postes, permettant la gestion de trente-deux transducteurs.

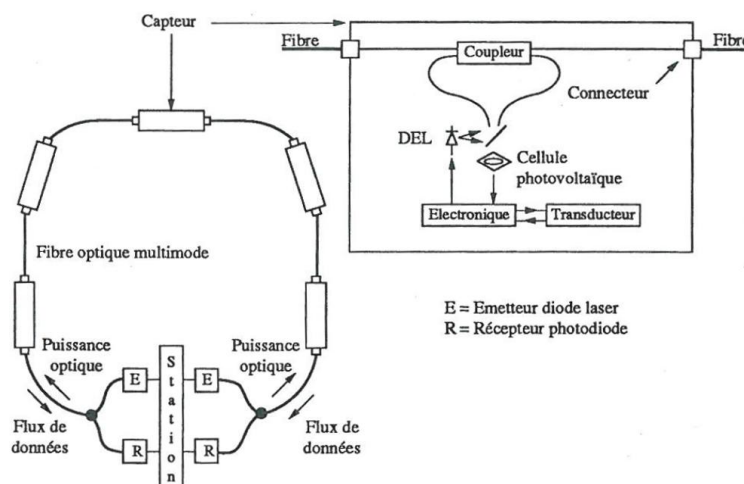


Figure 1.24 : Schéma d'un réseau opto-alimenté en boucle : exemple d'une boucle à cinq postes [Ferdinand 92].

En parallèle, F. Nauvelade a travaillé sur le développement d'un réseau opto-alimenté de vingt capteurs intelligents de pression et de température, répartis sur deux lignes (Figure 1.25) [Nauvelade 90]. Le réseau est composé :

- d'une source laser émettant 100 mW destinée à transmettre la puissance sur chaque ligne ;
- d'une source laser pour transmettre les commandes vers les capteurs ;
- de quatre lignes de fibres optiques multimodes (deux pour la puissance et deux pour les données) ;
- de stations de mesures composées chacune de l'électronique embarquée, de cellules de conversion O/E en Si, d'une DEL et du capteur.

L'intelligence du capteur est gérée avec un microcontrôleur présent à son côté. Ainsi, seul ce composant est alimenté en continu, et le capteur ne transmet ses mesures que sur ordre. Des batteries se chargent pendant l'inactivité du capteur et peuvent assurer 10 heures d'autonomie [Ferdinand 92]. Donc, un capteur ne pourra pas fonctionner en continu à long terme. La faisabilité a été démontrée avec trois capteurs.

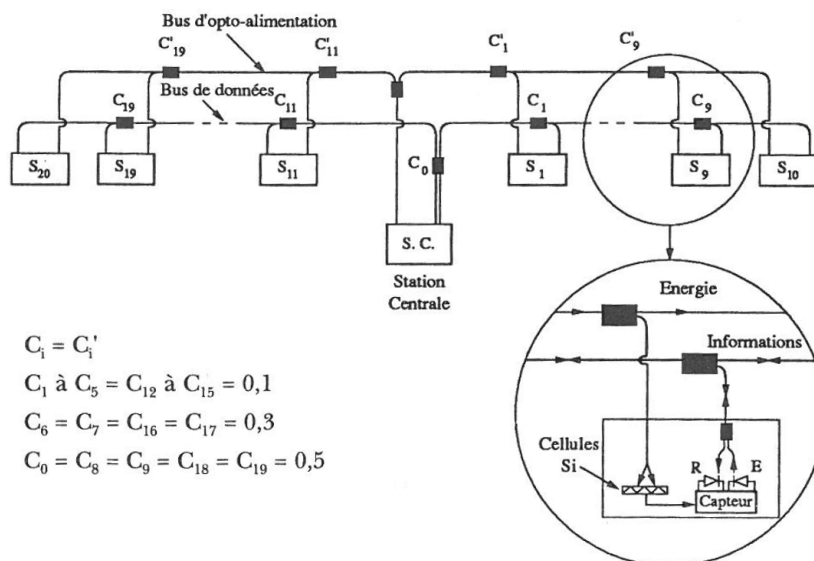


Figure 1.25 : Schéma du réseau à deux voies pour vingt capteurs [Ferdinand 92] (Ci désigne un coupleur optique, dont la part de puissance prélevée est indiquée par : 0,1 ou 0,3 ou 0,5).

En 1995, S.J. Pember a étudié une autre déclinaison d'un réseau de capteurs opto-alimentés : un réseau en arbre de quatre capteurs opto-alimentés [Pember 95] avec un fonctionnement similaire à celui de F. Nauvelade. Un laser source modulé à 6 kHz émet à 830 nm la puissance de 20 mW au maximum. Une DEL transmet à 870 nm les données de commande vers les capteurs. Les capteurs transmettent les données renvoyées avec une DEL d'une puissance optique de  $1,1 \mu\text{W}$  à 870 nm. Chaque onde optique se propage dans une fibre optique multimode longue de 200 m (Figure 1.26). Chaque capteur consomme, avec le circuit actif,  $465 \mu\text{W}$ . Pendant le fonctionnement du réseau, chaque capteur reçoit de l'énergie en continu, de l'ordre de 10 mJ, qu'il stocke dans un condensateur. Si la commande est adressée à un capteur, l'énergie est utilisée par le circuit actif et la DEL.

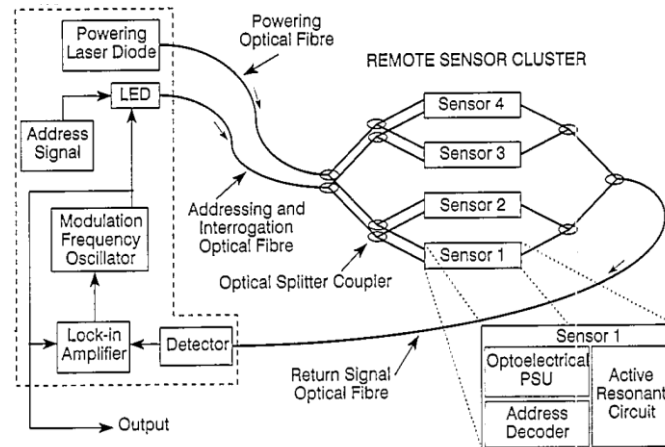


Figure 1.26 : Schéma du réseau en arbre de quatre capteurs opto-alimentés [Pember 95].

Au travers de ces quelques exemples de réseaux de capteurs opto-alimentés, nous constatons que la puissance sur fibre a réussi à sortir du laboratoire car les capteurs et les circuits électroniques employés sont devenus faiblement consommateurs. De plus, nous constatons que les dispositifs sont rarement déployés sur de longues distances. En effet, les limitations technologiques des composants employés, à savoir la source laser, la fibre optique ou les cellules photovoltaïques limitent les performances, et précisément l'énergie électrique disponible au niveau du capteur. Le développement de ces technologies durant les années 2000 permet un renouveau de la puissance sur fibre, dont les performances dépendront essentiellement de la distance à atteindre.

### 1.2.2.c.Applications récentes de la puissance sur fibre

Depuis la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, les technologies ont évolué et ont ainsi permis :

- l'augmentation de la puissance optique des sources laser, qui seront désormais qualifiées de haute puissance (SLHP : Source Laser de Haute Puissance) ;
- la diminution de l'atténuation de la fibre optique ;
- le développement des cellules photovoltaïques (amélioration du rendement et de la sensibilité en longueur d'onde).

Ces trois points sont cruciaux pour le développement d'un système opto-alimenté, et ont permis aux systèmes opto-alimentés de devenir compétitifs face aux systèmes alimentés électriquement.

Nous proposons de présenter et classer les applications récemment développées de la puissance sur fibre en fonction de la longueur de la fibre optique employée. En effet, la

technologie choisie pour la source laser, pour la fibre optique et pour la cellule photovoltaïque dépendent de la longueur à atteindre. Nous classons les dispositifs selon trois catégories :

- distance inférieure à 1 km ;
- distance de 1 à 2 km ;
- distance autour de 10 km.

Afin de faciliter la lecture, nous résumons dans le Tableau 1.1 les principaux paramètres des applications de la puissance sur fibre en fonction de la longueur de la fibre optique. Nous détaillons chaque catégorie dans la suite.

Distance	Moins de 1 km	1 à 2 km		10 km
Longueur d'onde de la SLHP	800 nm à 834 nm	900 nm à 1000 nm	1470 nm à 1600 nm	1470 nm à 1600 nm
Fibre optique (et atténuation)	Multimode (2-3 dB/km)	Multimode ou monomode (2-3 dB/km)	Multimode ou monomode (0,2-0,3 dB/km)	Monomode (0,2-0,3 dB/km)
Rendement de conversion O/E	50%	50%	25%	25%
Puissance électrique maximale délivrée	350 mW	100 mW	100 mW	10 mW

Tableau 1.1 : Principales caractéristiques des applications de la puissance sur fibre en fonction de la longueur de la fibre optique [Miyakawa 04, Werthen 05].

#### i. Distance inférieure à 1 km

Actuellement, les dispositifs les plus courants utilisant de la puissance sur fibre ont une longueur maximum de 1 km. La fibre optique employée est une fibre multimode, préférée à la fibre monomode, car la première supporte davantage de puissance. Les SLHP sont classiquement fabriquées en GaAs et émettent entre 800 nm et 850 nm. Les cellules photovoltaïques sont quant à elles en AlGaAs/GaAs et possèdent un rendement de conversion O/E optimal de 50% pour ces longueurs d'ondes de travail. Nous présentons par la suite trois exemples :

- une transmission radio sur fibre associée à la puissance sur fibre ;
- une caméra vidéo opto-alimentée ;
- un réseau de capteurs opto-alimentés.

L'immunité aux perturbations électromagnétiques dans un environnement à haute tension est exploitée dans le cas d'une antenne radio intérieure. D. Wake a présenté en 2008 un dispositif de transmission de signal radio sur fibre et d'opto-alimentation (Figure 1.27(a)) [Wake 08a]. La SLHP est capable d'émettre 2 W à 834 nm, mais elle est utilisée avec une puissance de 250 mW, ce qui est suffisant pour alimenter la station déportée. La source laser transmettant le signal radio montant est un VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser), émettant une puissance de -5 dBm à 850 nm avec une fréquence de 2 GHz. Les deux fibres optiques employées, longues de 300 m, sont multimodes. La conversion O/E de la puissance est réalisée avec une cellule photovoltaïque possédant un rendement de 50% à 830 nm. Le signal est converti sous forme électrique avec une photodiode en GaAs, qui possède une réponse fréquentielle de 6 GHz. Le module déporté consomme au total 92 mW (photodiode, VCSEL, électronique embarquée). Ce dispositif fonctionne et a montré la faisabilité de la transmission radio sur fibre associée à l'opto-alimentation.



Suite à ce travail, l'auteur a présenté en 2008 un dispositif similaire avec la combinaison de la puissance et des données dans une fibre optique à l'aide de multiplexeurs/démultiplexeurs (noté aussi Mux/Démux, ou WDM) (Figure 1.27(b)) [Wake 08b]. Les données, descendantes à présent, sont émises avec un laser FP (Fabry-Perot), émettant 1 mW à 1310 nm, et modulé à 2,5 GHz. La fibre optique multimode possède toujours une longueur de 300 m. Le signal est converti sous forme électrique avec une photodiode en InGaAs (environ 25% de rendement). Le dispositif fonctionne correctement et l'auteur a estimé être capable de délivrer 140 mW de puissance électrique en émettant 500 mW de puissance en sortie de la SLHP en utilisant des Mux/Démux spécifiques pouvant supporter cette puissance.

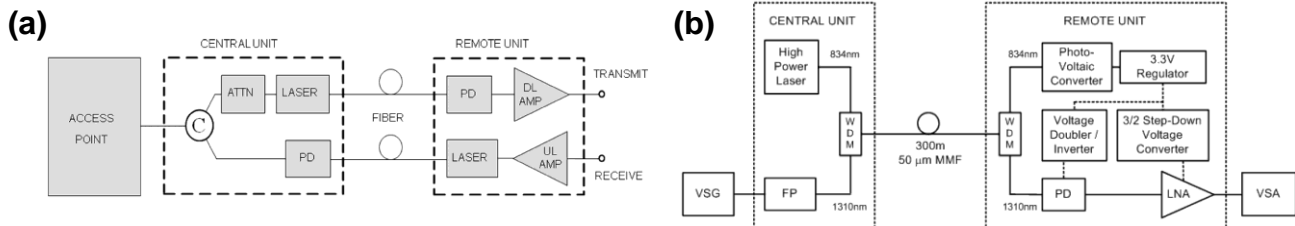


Figure 1.27 : Schéma général de la transmission radio sur fibre opto-alimentée (a) avec deux fibres optiques [Wake 08a] et (b) avec une fibre optique et des Mux/Démux [Wake 08b].

Durant la même période, M. Dreshmann, M. Hübner, M. Röger et G. Böttger ont travaillé sur une caméra vidéo opto-alimentée, dont la vidéo peut être transmise en continu. Le développement a débuté avec la transmission de la puissance et des données sur une fibre optique longue de 200 m [Böttger 08]. Le système, présenté en 2008, est composé d'une station de base émettant l'énergie et recevant les données, d'une fibre optique multimode, et d'une unité déportée alimentée optiquement, équipée de la caméra vidéo et transmettant la vidéo vers la station (Figure 1.28). La station de base est constituée d'une SLHP, émettant la puissance de 1 W à 810 nm, et d'une diode de réception pour les données. L'unité déportée requiert une puissance électrique de 103 mW. Elle est composée d'une cellule photovoltaïque dont le rendement est de 33% et d'une diode laser à 1310 nm, directement modulée à un débit de 100 Mbit.s<sup>-1</sup>. La caméra vidéo est une puce vidéo CMOS basse consommation, consommant 40 mW. La puissance et les données sont combinées et séparées de part et d'autre de la fibre par des Mux/Démux. D'après l'atténuation de la fibre et les pertes engendrées par les composants, une puissance de 670 mW, émise par le laser, est suffisante pour alimenter l'unité déportée.

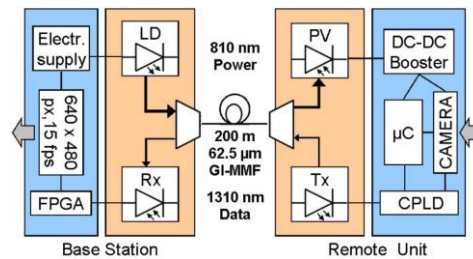


Figure 1.28 : Schéma du dispositif de caméra vidéo opto-alimentée [Böttger 08].

Le dispositif mis en place a servi de démonstrateur. Afin d'améliorer ses performances et d'atteindre celles d'un dispositif électrique identique, les travaux furent poursuivis [Dreschmann 10]. En 2010, la caméra vidéo est désormais motorisée et l'unité déportée est réduite en taille (Figure 1.29(a)). La station déportée possède un FPGA afin de gérer à haut

débit le traitement des données (Figure 1.29(b)). La diode laser, transmettant la puissance est modulée pour y superposer les commandes, avec un débit de  $100 \text{ kbit.s}^{-1}$ . L'énergie et les commandes sont séparées électriquement au niveau de la station déportée après la conversion O/E. Les données provenant de la station déportée sont transmises avec un débit de  $160 \text{ Mbit.s}^{-1}$  vers la station de base. La station déportée consomme au total 320 mW pour une puissance de 800 mW.

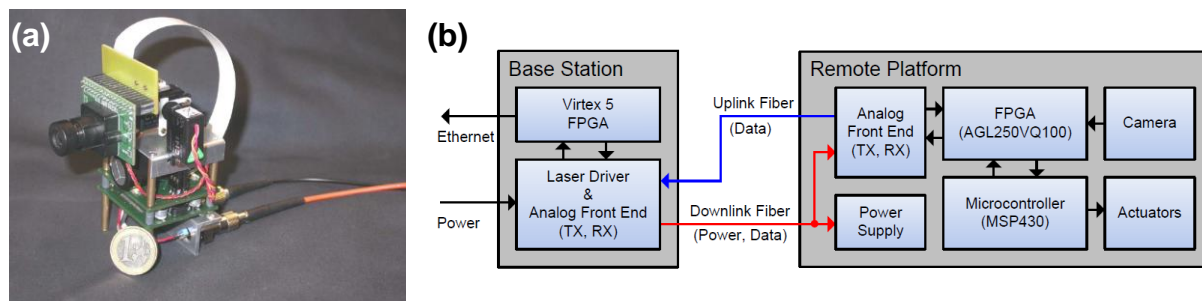


Figure 1.29 : (a) Photographie de la plateforme déportée et (b) Schéma du dispositif de caméra vidéo motorisée opto-alimentée [Dreschmann 10].

Nous proposons à présent un dernier exemple : un réseau de capteurs-opto-alimentés développés dans la même période par l'équipe de M. Dreschmann, M. Hübner, M. Röger et G. Böttger. Ils ont travaillé sur un réseau de capteurs opto-alimentés en forme d'étoile ou d'arbre, qui peut inclure la caméra vidéo mentionnée précédemment [Röger 08]. Le réseau est composé d'une station centrale, raccordée par des fibres optiques à des sous-unités de traitement, connectées aux capteurs (Figure 1.30). Les fibres optiques déployées font quelques centaines de mètres de longueur. La station est chargée de délivrer la puissance optique et les données descendantes vers les capteurs, et de réceptionner les données montantes provenant des capteurs. Les sous-unités, connectées aux capteurs gèrent la réception de l'énergie et des données descendantes, et transmettent les données montantes fournies par le capteur. La puissance moyenne électrique requise varie, en fonction du capteur, entre quelques microwatts (température, fumée), quelques milliwatts (mouvement, micro, photo) et une centaine de milliwatts (caméra vidéo). Étant donné que la puissance optique est séparée dans chaque branche du réseau, peu de puissance est directement disponible par branche (22 mW optique). Les capteurs ne délivrent donc pas leurs informations en continu et sont endormis jusqu'à ce qu'une commande leur ordonne de se réveiller et de mesurer. En attendant le réveil, l'énergie est stockée dans des condensateurs situés près du capteur.

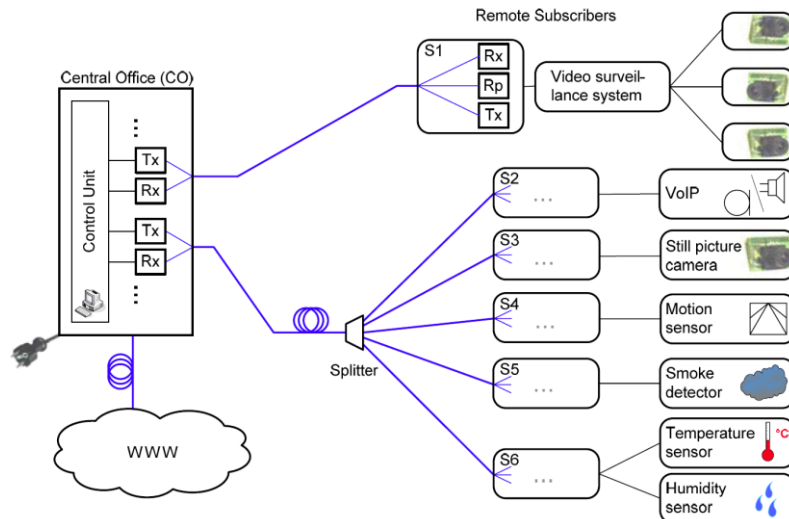


Figure 1.30 : Schéma du réseau de capteurs opto-alimentés [Röger 08].

Finalement, des dispositifs opto-alimentés, comparables à leurs semblables électriques, existent. Ils possèdent, rappelons le, l'avantage des systèmes optiques d'immunité aux perturbations électromagnétiques et aux courts-circuits. De plus, il est envisageable de constituer des réseaux de plusieurs capteurs opto-alimentés. Ces résultats sont possibles car, dans le cas d'une distance de l'ordre de quelques centaines de mètres, les fibres multimodes permettent de transporter une grande densité d'énergie grâce à leur relativement grand diamètre de cœur.

Dans la suite, nous continuons d'examiner les dispositifs de la puissance sur fibre, mais dans le cas de dispositifs dont la longueur de la fibre optique est comprise entre 1 km et 2 km.

## ii. Distance comprise entre 1 km et 2 km

Une architecture atteignant quelques kilomètres nécessite des SLHP émettant une puissance supérieure ou égale à 1 W. De telles sources existent depuis le début des années 2000, avec des longueurs d'ondes comprises entre 790 et 1000 nm, et à 1480 nm (la puissance de ces lasers saturait à 2 W [Guermache 05]) [Werthen 05]. La cellule photovoltaïque adaptée dans ce cas est en GaAs et la fibre multimode (diamètre de cœur de 50  $\mu\text{m}$  ou 62,5  $\mu\text{m}$ ) convient pour transporter de grandes puissances. Une fibre monomode peut être employée pour atteindre quelques kilomètres, mais la puissance est limitée à cause de son faible diamètre de cœur (environ 10  $\mu\text{m}$ ). En effet, un faible diamètre a pour conséquence d'amplifier le phénomène de diffusion Brillouin et ainsi de diminuer le seuil de puissance transmissible à quelques Watts (4 W maximum pour une distance de 1 km dans le cas d'une source laser dont la raie laser est fine) [Miyakawa 04]. Ce seuil diminue à mesure que la longueur de la fibre optique augmente. Nous présentons cette catégorie d'applications dans le cas de trois exemples :

- un module de transmission d'énergie optique et de données proposée par JDSU ;
- un bâtiment opto-alimenté ;
- un dispositif de transmission de musique opto-alimenté.

Le premier exemple concerne un module de transmission d'énergie optique et de données, sur une ou plusieurs fibres optiques (Figure 1.31) [Werthen 06], conçu par l'entreprise JDSU. Ce module peut s'étendre sur quelques kilomètres, en transmettant une puissance optique à 940 nm, dans une fibre multimode ou monomode, pour obtenir une centaine de milliwatts

électrique. La cellule photovoltaïque de puissance (désignée ici par PPC : Photovoltaic Power Converter) a un rendement optimal de 50%. Ce module est adapté à un capteur quelconque, alimenté électriquement, situé à une distance inférieure à 2 km de la SLHP (Figure 1.32) [JDSU 06a]. Un tel module est avantageux de par le bon rapport qualité/prix des sources laser et de leur durée de vie, prévue pour une dizaine d'années [Werthen 05].

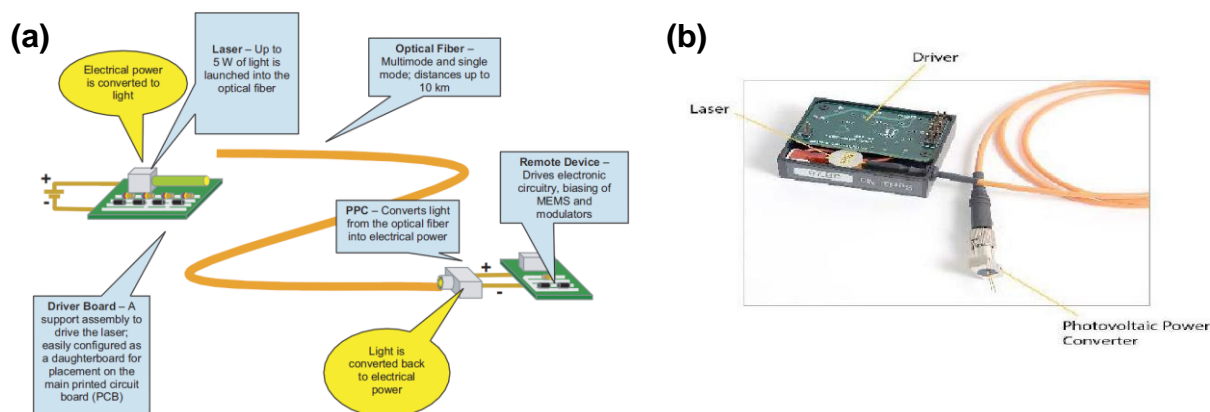


Figure 1.31 : (a) Schéma et (b) photographie du module d'énergie optique [JDSU 06a, Werthen 06].

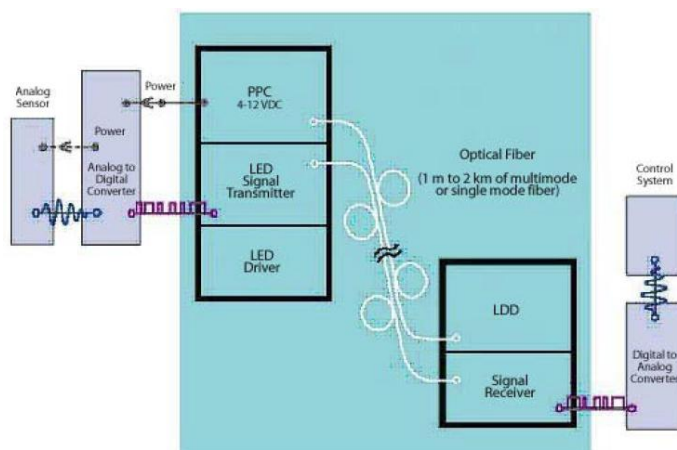


Figure 1.32 : Schéma de la liaison tout-optique de JDSU [JDSU 06a].

Dans le même cadre, H. Miyakawa a réfléchi au remplacement de l'énergie électrique par l'énergie optique, pour une distance de 1 km [Miyakawa 04]. Dans le cas de l'alimentation électrique, cette dernière est transmise soit par courant alternatif et requiert l'utilisation de convertisseur AC-DC, soit par courant continu. L'énergie transmise en continu dépend du diamètre du câble. Par exemple, la transmission de 90 mW ( $3 \text{ V} \times 30 \text{ mA}$ ) en continu sur 1 km nécessite un câble métallique de diamètre supérieur à 14 mm dans le cas d'une perte de puissance souhaitée à 10%, ce qui n'est pas réaliste. Pour résoudre ce problème, H. Miyakawa a proposé une architecture optique semblable à celle de JDSU. L'application visée est l'intégration d'un réseau local optique dans un immeuble. Les panneaux solaires chargent une batterie, qui alimente la SLHP. L'alimentation optique est transmise dans une fibre optique multimode déployée dans l'immeuble. L'énergie est convertie sous forme électrique à différents ports, afin de connecter le matériel électrique. Les signaux optiques sont combinés dans la même fibre optique. Ainsi, la fibre et le port d'un utilisateur servent de source d'alimentation et de moyen pour l'échange de données.

La même équipe a ensuite entrepris la réalisation d'un dispositif de transmission de musique (Figure 1.33) [Miyakawa 06]. Dans ce troisième exemple, les auteurs ont préféré changer la fibre optique et la bande spectrale optique couramment employées. La puissance et les données sont transmises avec une fibre optique monomode longue de 1 km dans la bande spectrale optique comprise entre 1200 nm et 1600 nm, où l'énergie sera moins atténuée par la fibre optique. Cela permet d'augmenter le débit des données. La SLHP est une diode laser émettant 22 dBm (160 mW) à 1474 nm. Les données sont transmises, en co-propagation avec la puissance, avec une diode laser à 1547 nm, directement modulée. Les deux ondes optiques sont combinées avec un Mux/Démux, puis sont séparées en sortie de la fibre par un second Mux/Démux. Une photodiode en InGaAs convertit le signal, qui est ensuite amplifié et transmis vers un haut-parleur. L'amplificateur est alimenté, d'une part avec une batterie fournissant 52 mW à la borne positive, et d'autre part avec une cellule photovoltaïque, fournissant 26 mW à la borne négative. Ce dernier composant, en InGaAs, convertit la puissance optique en puissance électrique avec un rendement environ égal à 25%. Le signal est transmis correctement à un débit de  $2,5 \text{ Gbit.s}^{-1}$ , avec ou sans puissance dans la fibre optique.

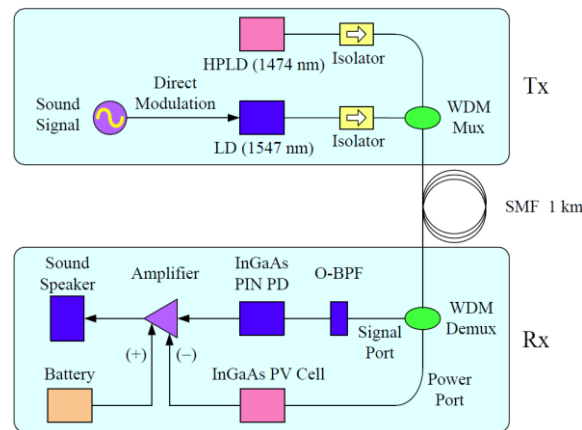


Figure 1.33 : Schéma du dispositif opto-alimenté de transmission de musique [Miyakawa 06]

La transmission de la puissance sur une distance de l'ordre de 1 km est donc possible, en la combinant ou non avec les données, dans une fibre multimode ou une fibre monomode, et avec des sources lasers transmettant respectivement dans la bande spectrale comprise entre 850 nm et 1000 nm ou entre 1200 nm et 1600 nm. La puissance électrique recueillie peut atteindre 100 mW au maximum.

À présent, il reste à étudier les dispositifs de puissance sur fibre s'étendant à une dizaine de kilomètres.

### iii. Distance d'une dizaine de kilomètres

Nous savons que l'atténuation de l'onde optique dans une fibre optique est d'autant plus grande que l'est la distance à parcourir. C'est pourquoi peu de dispositifs existent à la distance d'une dizaine de kilomètres. Le compromis technologique viable sur cette distance implique d'utiliser une fibre optique monomode (SMF-28 par exemple) car elle présente moins d'atténuation et moins de dispersion qu'une fibre multimode. Pour cette configuration, il est intéressant de changer de longueur d'onde de travail compte tenu de l'atténuation de la fibre optique. Dans ces conditions, la SLHP délivre de la puissance dans la bande spectrale optique comprise entre 1470 nm et 1600 nm, bande spectrale où l'atténuation de la fibre optique monomode SMF-28 est la plus faible [Werthen 05]. La puissance de transmission est limitée à



quelques centaines de milliwatts, pour des sources laser dont la raie laser est fine (c'est-à-dire inférieure à 0,01 nm, soit inférieure au GHz), car la diffusion Brillouin limite la puissance transmissible dans une fibre monomode. Il est toutefois à noter que ce phénomène dépend de la largeur spectrale à mi-hauteur de la source. Le fait d'utiliser des sources dont la largeur de bande spectrale est large comme les sources laser à amplification Raman augmente la puissance du seuil d'apparition de la diffusion Brillouin, et permet de délivrer une dizaine de Watts dans une fibre SMF-28. Les cellules photovoltaïques sont composées en InGaAs ou InP, avec un rendement de conversion O/E de l'ordre de 25%. La puissance électrique recueillie est de quelques milliwatts. Malgré la faible puissance électrique disponible, il existe des dispositifs longs de 10 km. Nous présentons deux exemples :

- un réseau de capteurs opto-alimentés,
- un dispositif de transmission de musique opto-alimenté.

Dans notre premier exemple, A. Takahashi a mis en place un réseau de capteurs opto-alimentés, déporté à 10 km en s'appuyant sur des travaux de la puissance sur fibre sur 1 km (Figure 1.34) [Takahashi 09]. La source laser est capable d'émettre quelques centaines de milliwatts à 1550 nm, dans une fibre optique monomode connectée à un coupleur (séparateur). Ce composant transmet la puissance vers les nœuds du réseau. Chaque nœud contient un capteur, une cellule photovoltaïque, un micro-processeur et un modulateur optique. Un nœud doit recevoir 1,5 mW de puissance optique afin de fonctionner. En conséquence, la puissance optique émise par la source dépend du nombre de nœuds à atteindre. La consommation totale d'un nœud est de 300  $\mu$ W. Une partie de la puissance incidente est modulée par un MEMS faiblement consommant. Le signal obtenu est ensuite renvoyé dans la fibre et atteint la station de base. Les expériences présentées ont montré la faisabilité d'un tel système et il est prometteur pour de nombreuses applications dans des environnements difficiles.

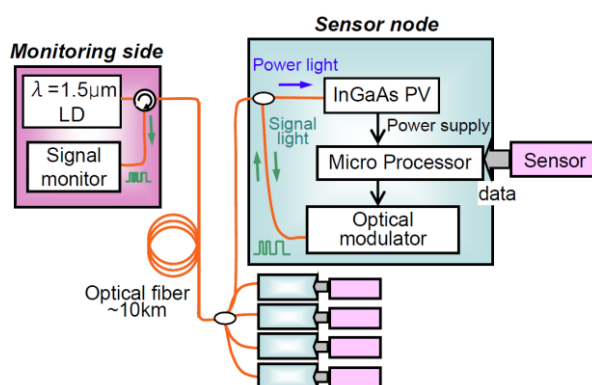


Figure 1.34 : Schéma d'un réseau opto-alimenté de capteurs déportés à 10 km [Takahashi 09].

Une autre déclinaison de la puissance sur fibre est proposée par X. Xu. Il s'agit de la transmission de la puissance et des données (de la musique), combinées par un Mux/Démux dans une fibre à dispersion décalée (DSF) longue de 10 km, associée à l'amplification paramétrique distribuée (DPA) [Xu 10]. Le phénomène de DPA consiste à amplifier le signal avec la puissance. La DSF permet simultanément de transmettre les deux ondes et d'amplifier le signal. Ainsi, la puissance transmise amplifie le signal et sert d'alimentation énergétique au niveau de l'instrument déporté. L'énergie convertie sous forme électrique permet d'alimenter la photodiode qui réceptionne les données (Figure 1.35). La SLHP transmet l'énergie avec une puissance de 23 dBm à 1548,8 nm. Les données sont émises à 1543 nm à une puissance moyenne optique de -20 dBm et sont modulées à un débit de 10 Gbit.s<sup>-1</sup>. Les deux ondes sont

transmises dans la DSF et un Mux/Démux sépare la puissance des données. La puissance électrique recueillie est de 6,6 mW. Cette expérience montre à nouveau la faisabilité du dispositif étendu sur 10 km dans le cadre de la puissance sur fibre et de l'amplification paramétrique.

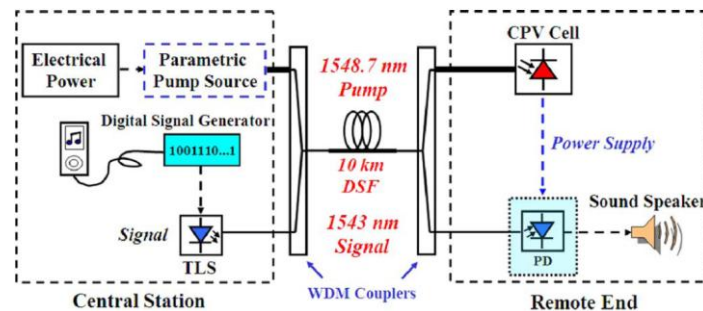


Figure 1.35 : Schéma simplifié du dispositif expérimental d'opto-alimentation et de transmission de données multiplexées, associées à l'amplification paramétrique distribuée [Xu 10].

Finalement, le fait de chercher à atteindre des distances d'une dizaine de kilomètres nous oblige à changer le type de fibre optique et les longueurs d'ondes employées. De plus, la distance implique une plus grande atténuation de la puissance et des données. En conséquence, les instruments reçoivent de l'énergie de l'ordre d'une dizaine de milliwatts au maximum, voire moins d'un milliwatt.

À partir de ces nombreux exemples, nous poursuivons notre analyse et nous résumons les paramètres clés de la puissance sur fibre grâce aux renseignements obtenus.

### 1.2.3. Paramètres clés de la puissance sur fibre

En effectuant le bilan sur les applications existantes, nous nous rendons compte que les performances de la puissance sur fibre sont dictées par les conditions d'utilisation et dépendent de divers paramètres, dont la longueur de la fibre, le type de fibre optique utilisée, la longueur d'onde de la source de puissance, la bande-passante du signal et le type de cellules photovoltaïques installées. Nous avons récapitulé dans les tableaux suivants les différentes technologies employées : la SLHP (Tableau 1.2), la fibre optique (Tableau 1.3) et la cellule photovoltaïque (Tableau 1.4).

Longueur d'onde	Matériaux	Puissance	Applications laser
808 nm	AlGaAs/GaAs	100 mW – 20 W	Pompe pour Nd:YAG à l'état solide
940 nm	InGaAs/GaAs	100 mW – 20 W	Pompe pour Yb:YAG à l'état solide
980 nm	InGaAs/GaAs	100 mW – 1 W	Pompe pour EDFA
1480 nm	InGaAs/InP	100 mW – 1 W	Pompe pour EDFA
1480 nm	(laser de pompe à 1064 nm)	100 mW – 10 W	Laser fibré à amplification Raman

Tableau 1.2 : Principales SLHP [Miyakawa 04, Werthen 05].

D'après le Tableau 1.2, nous constatons que les SLHP délivrant une grande puissance, supérieure à 1 W, émettent à 808 nm ou 940 nm. Les deux autres sources, émettant à 980 nm ou à 1480 nm, ont une puissance maximum de 1 W. La majorité des SLHP sont à fibre multimode. Seules les SLHP à 1480 nm sont à fibre monomode. Les sources lasers à fibre à amplification Raman sont récentes et sont employées dans le cadre de l'amplification de la

puissance des données pour les télécommunications optiques. Il est possible de s'en servir pour la puissance sur fibre.

Fibre optique	Longueur d'onde employée	Atténuation de la fibre	Applications et remarques
GI-MMF	800 – 870 nm, 930 – 980 nm,	2 – 3 dB/km,	Supporte la très haute puissance (1 kW) ; adaptée aux longues distances (> 1 km) ; transmission de signaux à un débit limité à 500 Mbit.s <sup>-1</sup> .km <sup>-1</sup> ; SLHP multimode non commercialisée à 1300 - 1600 nm.
	1300 – 1600 nm	0,5 – 0,6 dB/km	
SI-MMF	800 – 870 nm, 930 – 980 nm,	2 – 3 dB/km	Supporte la très haute puissance (100 W) ; adaptée aux courtes distances (< 1 km) ; transmission de signaux à un débit limité à 20 Mbit.s <sup>-1</sup> .km <sup>-1</sup> .
	1300 – 1600 nm	0,5 – 0,6 dB/km	
SMF	980 nm, 1300 – 1600 nm	2 – 3 dB/km, 0,2 – 0,3 dB/km	Supporte plusieurs watts, adaptée aux longues distances (> 1 km), transmission de signaux à haut débit (> 10 Gbit.s <sup>-1</sup> .km <sup>-1</sup> ).

Tableau 1.3 : Fibres optiques employées pour l'opto-alimentation [Miyakawa 04, Werthen 05].

D'après le Tableau 1.3, les fibres optiques et leur bande spectrale optique fixent la longueur d'onde des sources, ainsi que la distance parcourue par le dispositif de puissance sur fibre. Les fibres multimodes à saut d'indice (SI-MMF) et à gradient d'indice (GI-MMF) permettent de transporter de la puissance sans craindre de dégâts dans la fibre. Mais les SI-MMF ne sont pas adaptées aux distances supérieures au kilomètre à cause de leur atténuation. Les GI-MMF, bien qu'elles puissent transporter de la puissance sur une grande distance, ne peuvent être utilisées dans la bande optique 1300 – 1600 nm, car les SLHP commercialisées ne sont pas adaptées à ce type de fibre. C'est pourquoi ces fibres sont le plus souvent utilisées sur des distances de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. La fibre monomode (SMF) est adaptée à une distance d'une dizaine de kilomètres et elle permet de transmettre des signaux avec une grande bande passante, contrairement aux fibres multimodes.

Matériaux	Plage de détection en longueur d'onde	Rendement de conversion O/E
Si	800 – 1000 nm	25%
GaAs/AlGaAs	790 – 850 nm	50%
InGaAs/GaAs	900 – 1000 nm	50%
InGaAs/InP	1200 – 1600 nm	25%
Ge	1300 – 1600 nm	9%

Tableau 1.4 : Cellules photovoltaïques de puissance [Miyakawa 04, Werthen 05].

Le Tableau 1.4 récapitule les caractéristiques des cellules photovoltaïques. Les cellules photovoltaïques composées de Si étaient fréquemment utilisées jusqu'en 1990 puis ont été supplantées par les cellules GaAs, présentant un meilleur rendement. Les cellules GaAs ou AlGaAs possèdent un rendement optimal de 50% et sont les plus utilisées dans les dispositifs actuels de puissance sur fibre car elles sont sensibles dans la bande spectrale optique comprise entre 800 et 1000 nm. Dans le cas des sources émettant à 1480 nm, les cellules sensibles sont



à base de InGaAs ou InP et ont un rendement moindre, optimisé autour de 25%. Toutes les cellules photovoltaïques de puissance ont une puissance optique incidente limitée à quelques centaines de milliwatts.

Dans le § 1.2.2.c, nous avons récapitulé les dispositifs opto-alimentés récents en trois catégories selon la distances à parcourir et la puissance transmise. À partir des informations issues du Tableau 1.2, du Tableau 1.3, et du Tableau 1.4, nous pouvons définir précisément la technologie à employer dans chaque cas.

La première catégorie de dispositifs s'étend sur une centaine de mètres. La SLHP est composée en AlGaAs/GaAs, émet à 808 nm ou 940 nm une puissance comprise entre 1 et 20 W. Cependant, les SLHP sont utilisées avec une puissance optique maximale de 1 W. En effet, la consommation électrique de la station déportée n'exige pas autant de puissance optique à transmettre. Par ailleurs, les cellules photovoltaïques, fabriquées pour ce domaine d'application, ne sont pas dédiées à la réception d'une puissance optique supérieure à quelques centaines de milliwatts. La fibre optique employée est multimode, présente entre 2 et 3 dB/km d'atténuation, et supporte une grande puissance grâce à son grand diamètre de cœur (50 ou 62,5  $\mu\text{m}$ ). Nous pouvons citer la fibre à saut d'indice (SI-MMF) qui a un débit limitée à 20 Mbit.s<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>, et la fibre à gradient d'indice (GI-MMF) qui a un débit limité de l'ordre de 500 Mbit.s<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>. Le débit est limité à cause de la dispersion modale de ces fibres optiques. Les cellules photovoltaïques sont en AlGaAs/GaAs et possèdent un rendement de conversion O/E optimal de 50%. Dans ces conditions, la puissance électrique, recueillie au niveau de l'instrument est de l'ordre de quelques centaines de milliwatts.

La seconde catégorie de dispositifs s'étend sur quelques kilomètres. Deux plages en longueur d'onde peuvent être exploitées. La première plage s'étend de 900 nm à 1000 nm. Dans ce cas, les SLHP émettant 5 W de puissance, aux longueurs d'ondes de 920, 940, 960 ou 980 nm, sont actuellement couramment commercialisées. Et comme nous l'avons précédemment expliqué, les sources sont utilisées avec une puissance optique maximale de l'ordre de 1 W. La fibre optique employée est une fibre multimode avec parfois un cœur de diamètre de 100  $\mu\text{m}$  pour contenir la haute puissance transmise. Les cellules photovoltaïques sont en GaAs et ont un rendement de 50%.

La seconde plage s'étend de 1470 nm à 1600 nm. Dans ce cas, les SLHP employées émettent quelques centaines de milliwatts. La fibre optique est monomode, avec un cœur d'un diamètre de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ . En conséquence, la puissance incidente est limitée à quelques centaines de milliwatts si la largeur de bande spectrale de la source est étroite à cause de la diffusion Brillouin. Les cellules photovoltaïques sont à base de InGaAs et ont un rendement de 25%.

Un tel système permet d'obtenir une centaine de milliwatts électriques au niveau du terminal déporté.

La dernière catégorie concerne un terminal déporté à une dizaine de kilomètres de la SLHP. La fibre multimode, avantageuse pour transporter la haute puissance, atténue trop à une telle distance. Il est donc nécessaire d'utiliser la fibre monomode, qui possède d'ailleurs un grand débit, supérieure à 10 Gbit.s<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>. Les SLHP utilisées doivent avoir une longueur d'onde comprise entre 1300 et 1600 nm. Des sources à ces longueurs d'ondes existent et sont capables d'émettre entre quelques centaines de milliwatts à une dizaine de Watts. Les cellules photovoltaïques sont à base de InGaAs/InP avec un rendement optimal de 25%. La puissance électrique recueillie est de quelques milliwatts.

L'extension tout-optique à mettre en place dans notre projet se situe dans cette dernière catégorie. Cependant, l'énergie électrique à recueillir au niveau du terminal doit être de quelques centaines de milliwatts, et non de quelques milliwatts comme dans les applications courantes [Werthen 05]. Il existe aujourd'hui des sources laser à fibre à amplification Raman qui émettent une dizaine de Watts à 1480 nm ou 1550 nm. Nous pouvons envisager d'employer ce type de source pour augmenter la puissance électrique convertie au niveau du terminal.

### 1.3. Contexte de la thèse

Le but du projet, dans lequel s'intègre le travail présenté dans ce manuscrit, est de mettre en place une extension tout-optique, basée sur la transmission de la puissance et des données sur fibre optique, pour les observatoires de fond de mer (Figure 1.17). Ce projet conséquent demande de répondre à plusieurs objectifs :

- évaluer la faisabilité du transport de l'énergie et des données sur une ou plusieurs fibres optiques. Il s'agira d'étudier les phénomènes physiques engendrés par la propagation d'une grande puissance optique dans une fibre optique. Nous devons également évaluer les possibilités, les contraintes et les limites d'un tel dispositif en réalisant un démonstrateur en laboratoire ;
- concevoir un terminal électrique faiblement consommant, connecté au niveau du capteur. Ce terminal doit convertir l'énergie optique en énergie électrique, réceptionner les commandes provenant de la station terrestre et renvoyer sous forme optique, les données collectées par le capteur. L'énergie recueillie permettra d'alimenter l'ensemble des composants du terminal, dont le capteur, la source laser pour la génération sous forme optique des données, l'électronique embarquée et la photodiode pour la réception des données provenant de la station. L'électronique embarquée doit donc être faiblement consommante et doit être capable de gérer le flux de données selon le protocole de communication choisi ;
- tester un démonstrateur en milieu marin. Ce démonstrateur devra être déployé à une distance maximale de 10 km et sera connecté à une boîte de jonction. La boîte de jonction contiendra, en plus des équipements habituels, la SLHP pour la transmission de l'énergie optique, impliquant l'intégration du matériel. Le câble contenant la ou les fibres optiques devra être adapté au milieu marin. La connectique employée devra permettre la connexion de la fibre optique en milieu marin de façon étanche.

La conception du terminal faiblement consommant fait l'objet d'une thèse en cours au laboratoire, réalisée par S. Perhirin. Quant aux tests du démonstrateur en milieu marin, ces travaux sont entrepris à l'IFREMER. L'objectif de la thèse, décrite dans ce document, concerne le premier sujet exposé. Nous devons mettre en place une architecture tout-optique au laboratoire pour montrer la faisabilité de la transmission de la puissance et des données sous forme optique dans les conditions requises par le projet global.

La réflexion sur l'architecture du prototype doit prendre en compte la connectique sous-marine. Les connecteurs étanches pour les câbles sous-marins existent. Mais, leur coût est très élevé, ce qui rend quasiment inabordable le déploiement de plusieurs fibres optiques. Ceci contraint à transporter la puissance et les données échangées sur une fibre optique unique. La puissance et les données échangées seront donc multiplexées. Ce choix expose à des interactions possibles entre la puissance et les données transmises ensemble.

Donc, afin de répondre aux besoins exprimés dans le cadre de l'extension des observatoires de fond de mer, le dispositif à développer doit respecter le cahier des charges suivant :

- la longueur de la fibre pourra atteindre 10 km ;
- la puissance et les données doivent être transmises avec une seule fibre optique ;
- la puissance électrique utile visée, au niveau de l'instrument, devra atteindre quelques centaines de milliwatts ;
- la transmission des données sera bidirectionnelle ;
- les données devront être transmises en temps réel, et en permanence, avec un débit d'au moins 5Mbit/s.

D'après les recherches bibliographiques menées dans le domaine de la puissance sur fibre et le bilan qui a été dressé, nous avons constaté que notre projet se place dans la catégorie des dispositifs longs d'une dizaine de kilomètres. Cependant, la puissance électrique maximale délivrée, dans ce genre de dispositifs existants, reste au maximum de l'ordre de quelques milliwatts. Et la puissance électrique exigée par notre projet est seulement obtenue dans le cas de dispositifs longs de moins d'un kilomètre. La suite du travail consiste donc à aller bien au-delà de cette limite du kilomètre et donc à concevoir une architecture pour répondre à notre cahier des charges tout en tenant compte de la disponibilité commerciale du matériel à employer.

## Conclusion du chapitre 1

Dans ce premier chapitre, nous avons défini un observatoire sous-marin comme étant un système sans équipage, muni de capteurs et localisé en un site fixe. Il permet de recueillir des informations sur le comportement des fonds marins et le processus d'évolution de la croûte terrestre. Nous avons distingué les différents types d'observatoires de fond de mer existants : autonome, à liaison acoustique ou câblé. Dans le but d'étudier le comportement des fonds océaniques en temps réel et à long terme, il est prouvé qu'il est préférable d'installer un réseau câblé d'observatoires sous-marins. Les câbles installés permettent d'alimenter en énergie les instruments et d'échanger des données. L'état de l'art des réseaux câblés a décrit leur évolution en fonction des technologies existantes. Un problème permanent intervient pour chaque observatoire : le coût des câbles et de leur déploiement. Parfois, il est possible de réutiliser un câble de télécommunications hors service ou de mutualiser l'utilisation du câble entre plusieurs projets pour réduire les coûts. Toujours est-il que ce domaine de recherche connaît une évolution importante, et que l'on voit apparaître actuellement des réseaux câblés d'observatoires sous-marins de grande envergure. Ils permettent d'obtenir davantage d'informations pour analyser les fonds marins à long terme et de façon globale.

Les observatoires câblés sont fixes et leur installation est onéreuse. En conséquence, l'extension d'un observatoire est difficile car elle exige les mêmes moyens coûteux que pour l'installation de l'observatoire lui-même. Il est nécessaire de trouver une solution pour rendre flexible un observatoire câblé et de faciliter son extension. Nous proposons de simplifier ce déploiement en réalisant une extension tout-optique longue d'une dizaine de kilomètres. Un câble optique, contenant une ou plusieurs fibres optiques, est le support de l'énergie et des données. Il s'agit donc d'associer la puissance sur fibre (ou opto-alimentation) et la transmission de données par fibre optique.

La fibre optique est très connue pour son utilisation en télécommunications optiques ; elle l'est moins pour une application de transport de puissance. Les travaux sur ce sujet ont débuté en 1978 et ont rencontré des difficultés pour sortir des laboratoires, et pour être appliqués. En effet, la puissance électrique recueillie après conversion O/E restait faible. Le développement de la technologie sur les aspects clés de la puissance sur fibre (la source laser, la fibre optique et la cellule photovoltaïque) permet aujourd'hui la réalisation de dispositifs performants. L'avantage principal de cette application est l'immunité de la fibre optique aux perturbations électromagnétiques, et la souplesse de déploiement dans certains environnements (environnement marin par exemple). Un dispositif opto-alimenté peut donc être déployé dans des environnements hostiles pour des liaisons électriques. Nous avons distingué trois catégories selon la distance à parcourir. Le premier cas concerne les systèmes longs de quelques centaines de mètres à un kilomètre. Il s'agit des systèmes les plus répandus et ils permettent de recueillir quelques centaines de milliwatts électriques au niveau de l'instrument déporté. La seconde catégorie s'étend entre 1 et 2 km. Ces systèmes permettent d'atteindre les mêmes performances. Le dernier cas correspond à un instrument déporté à une dizaine de kilomètres. Les applications existantes sont plus rares et actuellement seulement quelques milliwatts électriques sont transmis à l'instrument.

Notre application se place dans ce dernier cas, où nous souhaitons transmettre une centaine de milliwatts électriques à l'instrument. Nous abordons un domaine peu exploré de la puissance sur fibre en raison des puissances que doit transporter la fibre optique de notre dispositif, pour fournir sur une distance allant jusqu'à 10 km une centaine de milliwatts électriques. Par ailleurs, nous avons défini le cahier des charges du système en choisissant une

fibre optique unique pour transporter simultanément l'énergie et les données, étant donné le prix prohibitif de la connectique sous-marine pour des systèmes multi-fibres. Nous sommes conscients que ce choix nous expose à de fortes interactions entre la puissance optique transportée pour l'énergie, et celle réservée aux données. Ce sera un des objets principaux de l'étude présentée ensuite tout au long de ce manuscrit





# Chapitre 2 : Architecture du prototype de l'extension tout-optique

## Sommaire

Introduction du chapitre 2 .....	48
2.1. Réflexions sur l'élaboration du dispositif tout-optique.....	50
2.1.1. Choix technologiques.....	50
2.1.2. Effet destructif : fusion de fibre (« Fiber Fuse ») .....	53
2.1.3. Description des phénomènes optiques .....	56
2.2. Dispositif expérimental .....	63
2.2.1. Présentation du dispositif.....	63
2.2.2. Conversion E/O.....	64
2.2.3. Composants.....	68
2.2.4. Conversion O/E.....	71
Conclusion du chapitre 2.....	79

## Introduction du chapitre 2

Le projet opto-alimentation propose d'étendre un réseau câblé d'observatoires de fond de mer avec une solution tout-optique. Une fibre optique transporte à la fois l'énergie nécessaire à l'alimentation de la station déportée, et les données échangées. L'avantage de cette solution est la possibilité de déployer un tel équipement avec des moyens légers, c'est-à-dire sans l'intervention d'un navire câblé, compte tenu de la légèreté et du faible encombrement de la fibre optique. Le projet global comporte des aspects optique et électrique, ainsi qu'un travail de marinisation. Dans ce contexte, le travail de thèse présenté dans ce manuscrit concerne uniquement l'étude en laboratoire de la faisabilité de la liaison tout-optique qui doit répondre au cahier des charges suivant :

- le dispositif doit s'étendre sur une longueur de 10 km,
- la puissance et les données sont transmises sur une seule fibre optique,
- la puissance électrique au niveau de l'instrument doit atteindre quelques centaines de milliwatts,
- les données sont transmises de façon bidirectionnelle, en temps réel.

La Figure 2.1 présente l'architecture générale de l'extension développée dans le cadre de la thèse. Celle-ci comporte une unique fibre optique, et se compose de trois parties : l'interface BJ (Boîte de Jonction), la fibre optique et le terminal. L'interface BJ contient une SLHP (Source Laser de Haute Puissance) et une source laser pour les données descendantes, et en outre réalise la conversion O/E des mesures provenant de l'instrument. La SLHP transmet dans la fibre optique l'énergie nécessaire à l'alimentation du terminal. Le terminal contient l'interface I (Instrument) et l'instrument. L'interface I est chargée de convertir l'énergie optique sous forme électrique afin de la distribuer dans le terminal. Cette interface réalise également la conversion O/E (Optique/Électrique) des données provenant de la station, et transmet les mesures provenant de l'instrument avec un module de conversion E/O.

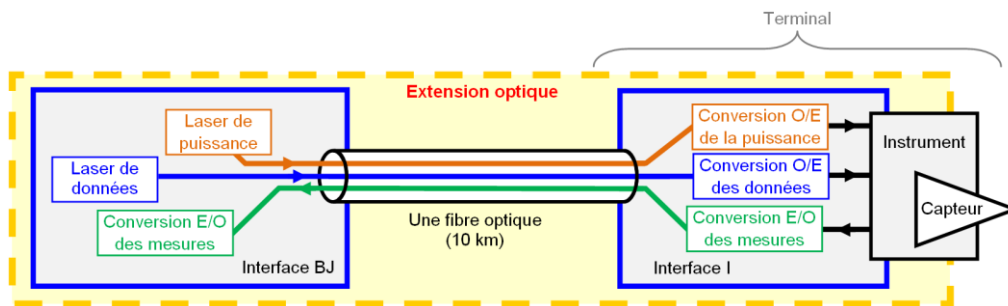


Figure 2.1 : Architecture de l'extension tout-optique avec une fibre optique.

Ce chapitre décrit en détail, les choix effectués pour la conception de l'extension tout-optique ainsi que l'architecture du prototype développé compte tenu des exigences du cahier des charges.

L'optimisation des performances (rendements énergétiques et qualité de la communication) du banc d'opto-alimentation nécessite au préalable de fixer un certain nombre de paramètres (longueurs d'onde, puissance, etc.) en tenant compte de diverses contraintes.

Dans un premier temps (section 2.1), nous discutons des principales caractéristiques du dispositif en s'aidant des informations issues de l'état de l'art (chapitre 1). Nous évoquons les limites technologiques et les phénomènes physiques intervenant dans l'élaboration de l'extension. Dans cette section, nous justifions, tout d'abord, le choix des composants. Nous

présentons ensuite le phénomène de fusion de fibre qui peut être destructif pour les composants et la fibre, et qui peut se produire dans notre dispositif étant donné les fortes puissances optiques guidées mises en jeu. Enfin, nous décrivons les phénomènes physiques pouvant se produire lors de la propagation d'une ou de plusieurs ondes optiques dans la fibre optique. Cette analyse nous permet d'aborder la réalisation concrète du dispositif.

Dans un second temps (section 2.2), nous présentons de manière exhaustive le dispositif expérimental développé. Nous décrivons les sources lasers choisies dans le cadre de la conversion E/O. Puis, nous détaillons les caractéristiques de chaque composant passif du dispositif, dont la fibre optique. Enfin, nous présentons le module de conversion O/E destiné à fournir l'énergie d'alimentation.

## 2.1. Réflexions sur l'élaboration du dispositif tout-optique

Les difficultés que nous pouvons rencontrer dans le développement du dispositif proposé sont essentiellement liées à la présence de fortes puissances optiques. D'une part, les composants opto-électroniques sont à ce jour rarement conçus pour des applications de puissance, et si toutefois c'est le cas, leurs performances restent limitées. D'autre part, les non-linéarités induites dans la fibre optique dégradent la transmission des données et de l'énergie.

Dans la suite, nous allons recenser et décrire les limitations technologiques et physiques auxquelles nous devons faire face. Nous nous appuyerons sur les informations collectées lors de l'étude de l'état de l'art de la puissance sur fibre (chapitre 1, § 1.2).

### 2.1.1. Choix technologiques

Le dispositif à mettre en place s'étend sur une dizaine de kilomètres. Or, l'état de l'art de la puissance sur fibre a révélé que la longueur de la fibre optique est un paramètre primordial dans le choix du type de la fibre et dans le choix de la longueur d'onde employée. Ces choix dépendent également de la technologie disponible pour les composants à insérer dans notre dispositif. Nous présentons et nous justifions les options prises pour notre extension tout-optique. Dans le même temps, nous discutons des limitations technologiques, dues à nos choix.

#### 2.1.1.a. Fibre optique

Tout d'abord, il est nécessaire de choisir le type de fibre optique (monomode ou multimode) sur laquelle vont se propager les ondes optiques dédiées à l'énergie et aux données échangées.

Nous savons que la fibre multimode autorise la transmission d'une densité d'énergie importante de par son grand diamètre de cœur (50  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ ), contrairement à la fibre monomode (10  $\mu\text{m}$ ). Cependant, dans le domaine des télécommunications et dans le domaine de la puissance sur fibre, la fibre optique monomode est privilégiée par rapport à la fibre multimode pour ses faibles pertes optiques, sa faible dispersion chromatique et son coût relativement bas. Par ailleurs, la majorité des composants optiques que l'on retrouve sur le marché, et indispensables pour le développement de notre banc, sont conçus pour fonctionner avec une fibre monomode. Ainsi notre choix s'est porté sur une fibre standard monomode SMF-28 couramment utilisée pour les télécommunications à haut débit sur de longues distances.

Une fibre optique n'est pas parfaite. Dans le cas de la fibre monomode, deux types d'absorption engendrent des pertes lors de la propagation d'une onde optique [Joindot 96] :

- l'absorption extrinsèque : elle est liée à la composition, à la forme et aux actions appliquées (courbures, raccord, ...) sur une fibre ;
- l'absorption intrinsèque : elle est liée à l'aspect microscopique du guide. Les absorptions intrinsèques se résument aux transitions électroniques, responsables de l'absorption ultraviolette, et aux vibrations du réseau, responsables de l'absorption infrarouge. En outre, l'onde circulant dans le guide est atténuée par la diffusion Rayleigh. L'ensemble de ces phénomènes sont représentés sur la Figure 2.2.

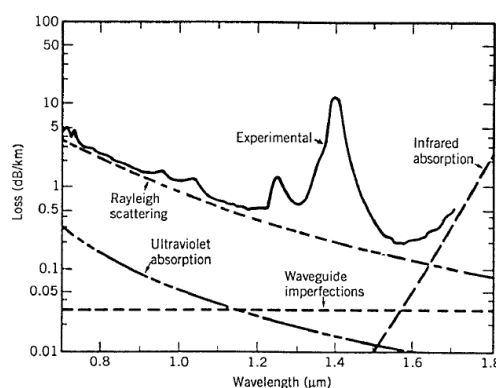


Figure 2.2 : Atténuation spectrale de la fibre monomode  $\text{SiO}_2$  [Agrawal 02].

Le type de la fibre optique étant fixé, nous pouvons à présent choisir les longueurs d'ondes de la puissance et des données, transmises dans cette fibre optique. Le choix des longueurs d'ondes déterminera en conséquence le choix des sources laser et des cellules photovoltaïques.

### 2.1.1.b. Longueur d'onde

Le choix de la longueur d'onde portant l'énergie provient d'un compromis entre différents critères : l'atténuation de la fibre optique, la disponibilité des lasers à fibre continus de forte puissance ( $>5$  W), mais aussi le rendement de conversion O/E des cellules photovoltaïques. Nous pouvons rappeler les informations recueillies lors de l'état de l'art sur puissance sur fibre (Chapitre 1) :

- les lasers de puissance à fibre les plus répandus fonctionnent aux longueurs d'ondes de 980 nm et 1480 nm [Werthen 05] ;
- les pertes optiques des fibres varient en fonction de la longueur d'onde [Agrawal 02]. D'après la Figure 2.2, présentant la courbe d'atténuation de la fibre monomode SMF-28, le minimum d'atténuation se situe autour de 1550 nm (environ 0,2 dB/km) ;
- les cellules photovoltaïques possèdent des rendements de conversion de l'ordre de 50% pour les longueurs d'ondes autour de 980 nm et 25% pour les longueurs d'ondes autour de 1550 nm [Werthen 05, Fahrenbruch 96].

Le choix de la longueur d'onde du faisceau optique portant l'énergie doit permettre de maximiser le rendement énergétique du système ; il faut donc étudier l'influence cumulée de l'atténuation de la fibre et du rendement de conversion O/E des cellules photovoltaïques sur le rendement total du système. La Figure 2.3 présente cette évolution pour deux longueurs d'ondes (980 nm et 1480 nm) en fonction de la longueur de la fibre optique. Pour réaliser ces courbes, l'atténuation de la fibre optique est supposée égale à 0,3 dB/km à 1480 nm, et égale à 3 dB/km à 980 nm. Le rendement de conversion est supposé égal à 25% à 1480 nm, et à 50% à 980 nm. Pour des longueurs de fibres supérieures à 1 km, il apparaît très clairement qu'il faut privilégier une longueur d'onde de 1480 nm.

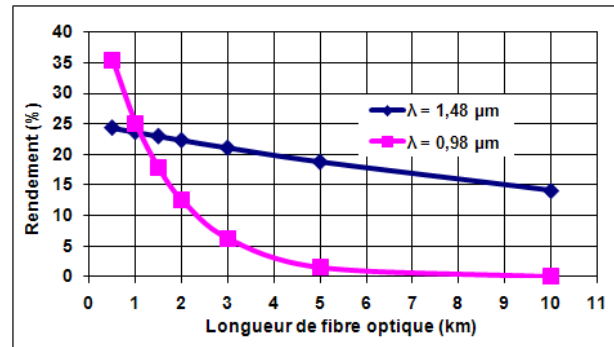


Figure 2.3 : Rendement de transmission et de conversion O/E.

Compte tenu du cahier des charges qui impose une longueur de fibre optique de 10 km, nous avons donc retenu la longueur d'onde 1480 nm pour le transport de l'énergie d'alimentation. En ce qui concerne la longueur d'onde du faisceau optique portant les données, nous l'avons choisie à 1550 nm de manière à pouvoir utiliser les composants classiquement disponibles dans le domaine des télécommunications optiques et à bénéficier de la faible atténuation de la fibre à cette longueur d'onde.

### 2.1.1.c. Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques utilisées à 1480 nm sont fabriquées à base de InGaAs et possèdent un rendement de conversion O/E de 25%. D'après le cahier des charges, la puissance disponible au niveau du terminal doit atteindre quelques centaines de milliwatts. Donc, la puissance optique incidente doit être quatre fois plus grande, soit supérieure à 400 mW (26 dBm). Or peu de cellules photovoltaïques supportent de telles puissances. Il existe cependant chez certains constructeurs des cellules photovoltaïques conçues pour des applications de puissance : les PPC (Photovoltaic Power Converter).

Ces cellules photovoltaïques de puissance sont normalement dédiées à recevoir une centaine de milliwatts optiques. Leur caractérisation nous permettra de connaître leurs performances réelles en présence de puissances optiques importantes et par la suite d'optimiser leur utilisation.

### 2.1.1.d. Sources laser

La SLHP doit être une source laser à fibre émettant autour de 1480 nm. Il reste cependant à déterminer la puissance optique en sortie de la source. Le cahier des charges stipule que la puissance disponible au niveau du terminal doit atteindre quelques centaines de milliwatts. Or pour la longueur d'onde de 1480 nm, les cellules photovoltaïques couramment utilisées possèdent un rendement de conversion autour de 25% (-6dB) et la puissance optique est atténuée d'environ 50% (-3 dB) à la longueur d'onde de 1480 nm pour une distance de 10 km. Ainsi la puissance électrique exploitable par le terminal est, au maximum, égale à 12,5% de la puissance optique émise par le laser (les pertes dues aux différents composants présents dans la chaîne et aux connexions ne sont pas prises en compte dans cette estimation). En prenant une marge de sécurité pour assurer la fourniture d'énergie électrique nécessaire au bon fonctionnement du terminal, nous avons estimé qu'une puissance de 5 W délivrée par la SLHP serait suffisante.

D'après l'état de l'art de la puissance sur fibre, nous savons que les SLHP les plus courantes sont à base de InGaAs/InP et émettent à 1480 nm une puissance de 1 W au maximum. Ces sources ne sont donc pas adaptées pour notre application. Cependant, des

SLHP répondant à nos exigences existent depuis quelques années. Il s'agit des sources lasers à fibre à amplification Raman. Ces sources sont souvent utilisées pour des applications de l'amplification Raman d'un signal dans une fibre optique, dans le cadre des télécommunications optiques. Nous avons choisi d'utiliser ce type de SLHP pour notre dispositif.

Les sources lasers employées pour les données doivent émettre autour de 1550 nm avec des puissances standard pour ce type de liaison optique longue de 10 km, soit une puissance de l'ordre de 0 dBm pour éviter que ces sources ne consomment trop. Ce critère de faible consommation est surtout important au niveau du terminal. De telles sources existent et sont couramment employées en télécommunications ou pour des applications capteurs.

### **2.1.1.e. Composants optiques**

Les composants constituant le dispositif doivent guider les ondes optiques (puissance et données) de l'interface BJ vers le terminal. Ces composants fibrés doivent être capables de supporter la puissance de la SLHP sans engendrer des pertes optiques importantes. Or, les composants commercialisés, couramment employés en télécommunications optiques, supportent généralement jusqu'à 23 dBm au maximum. Nous devons donc rechercher des composants spécifiques, capables de supporter quelques Watts optiques et qui correspondent également à nos choix de longueurs d'ondes. Nous devons également faire attention à la manière de connecter ces composants. En effet, la puissance transmise peut endommager les connecteurs, ainsi que la fibre optique monomode. Nous décrivons ci-après les dommages susceptibles d'apparaître dans notre dispositif.

### **2.1.2. Effet destructif : fusion de fibre (« Fiber Fuse »)**

Étant donné les fortes puissances optiques guidées mises en jeu, il semble naturel de s'inquiéter des dommages que peut subir la fibre [Namiki 06].

La fibre optique en silice est capable de supporter plus de  $10 \text{ GW/cm}^2$  [Kashyap 88]. D'après les données du constructeur [Corning 02], la fibre optique SMF-28 possède un diamètre de cœur de  $8,2 \mu\text{m}$ . Une fibre SMF-28 est ainsi capable de supporter plus de 21 W. Par contre, dès lors que la fibre optique subit des contraintes, le seuil de dommage diminue et la fibre optique peut alors être endommagée.

En effet, la fibre optique peut être brûlée si elle subit une torsion particulière. La forte puissance optique est alors absorbée et la température augmente alors dans le matériau. Des expériences ont montré que ce phénomène se réalise si la fibre optique forme une boucle de moins de 1 cm de diamètre [Corning 02].

La puissance en sortie de fibre est aussi une grande cause de dommages. En effet, un phénomène optique appelé fusion de fibre (« fiber fuse ») se produit dans le cas où une onde de très forte puissance se propage au sein d'une fibre dont l'extrémité est endommagée par contact, chauffage ou par présence de poussières [Namiki 06, Schuto 04]. Une réflexion de l'onde, observable à l'œil nu (Figure 2.4), peut alors se produire pouvant entraîner la fusion de la fibre. Des bulles apparaissent alors au sein du cœur (Figure 2.5), détruisant le guidage et empêchant ainsi toute nouvelle propagation d'ondes optiques. Ce phénomène est présenté sur la Figure 2.6. Dans le cas de la transmission de la puissance en continue, le seuil de dommage



est égal à  $2 \text{ MW/cm}^2$  [Seo 03]. Dans le cas d'une fibre optique SMF-28, l'extrémité endommagée a alors un seuil de dommage égal à 1,35 W (31,3 dBm) dans cette situation. Cette valeur a été vérifiée par des expériences [Seo 03, Shuto 04].

Nous avons effectivement observé ce phénomène lors de nos caractérisations en régime statique avec une puissance de 2 W car la fibre optique était écrasée en son extrémité. Nous présentons des photos de la fibre optique avant et après la fusion (Figure 2.5). Ces photos ont été prises avec la caméra microscopique de la soudeuse Fujikura 60-S.

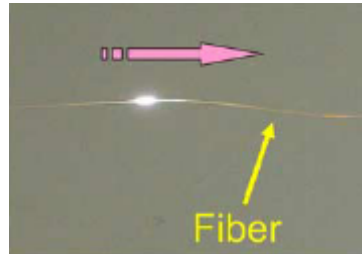


Figure 2.4 : Propagation de la fusion de fibre visible le long de la fibre [Namiki 06].

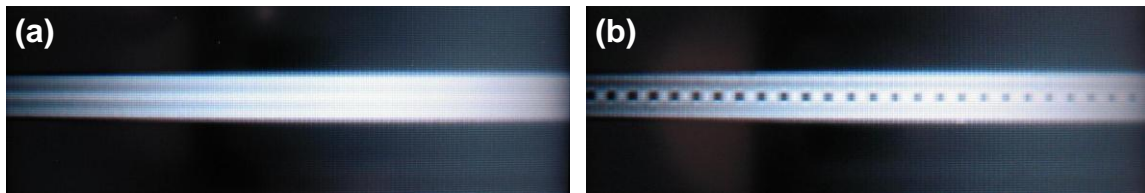


Figure 2.5 : Coupe longitudinale de la fibre optique (a) avant et (b) après propagation de la fusion.

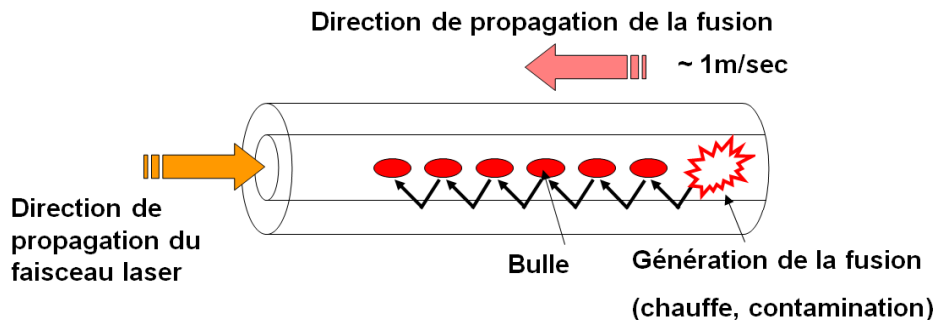


Figure 2.6 : Processus de la fusion de fibre.

Un moyen pour éviter ce phénomène de forte densité de puissance est d'utiliser une fibre optique avec un diamètre de cœur plus grand comme les fibres multimodes. Cependant, nous devons conserver la fibre monomode pour une transmission sur longue distance, et nous devons donc chercher des solutions pour limiter ce phénomène. Il existe des fibres dont le seuil est bien supérieur à celui des fibres monomodes. Nous ne pouvons pas les déployer sur une dizaine de kilomètres compte tenu de leur coût. On peut aussi envisager d'insérer un tronçon dans la chaîne pour arrêter la propagation de la fusion. Des travaux ont montré que les fibres nommées HAF (Hole-Assisted Fiber) et PCF (Photonic Crystal Fiber) possèdent cette particularité [Hanzawa 10]. Elles possèdent un cœur central, entouré d'une quantité variable de trous d'air placés à différentes positions (Figure 2.7). Ces fibres peuvent arrêter la propagation de la fusion de fibre en diffusant la lumière dans les trous d'air et en faisant fondre en partie le cœur de la fibre micro-structurée. Ce type de fibre pourrait donc nous

servir de « fusible » pour éviter la propagation de la fusion de fibre dans les composants critiques.

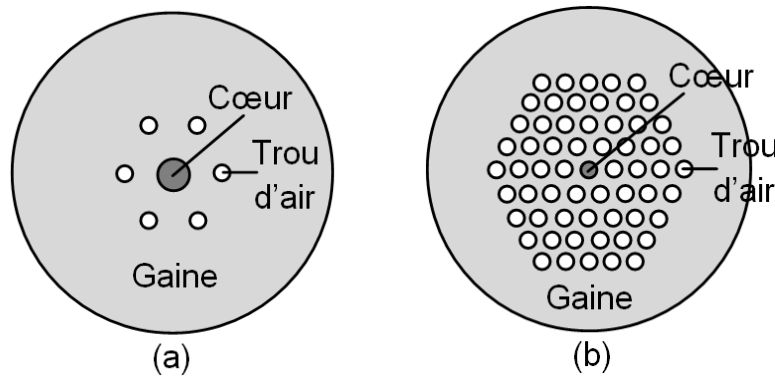


Figure 2.7 : Section de fibres optiques : (a) HAF et (b) PCF.

Par ailleurs, il est à noter que la propreté des connecteurs est un élément fondamental pour éviter leur endommagement lorsque la puissance optique transportée augmente (Figure 2.8). L'introduction d'une contamination au niveau des connecteurs conduit à une augmentation de la température localement et par suite à la génération du phénomène de fusion de fibre. Si la surface du connecteur est endommagée à cause de la contamination, le connecteur engendre ainsi entre 50% et 70% de pertes optiques supplémentaires [Namiki 06]. Et le connecteur endommagé peut ensuite engendrer le phénomène de fusion de fibre.



Figure 2.8 : Photographie d'un connecteur (a) avant et (b) après contamination.

Les dommages occasionnés dans les composants par la propagation de la haute puissance dans la fibre optique nous amènent à remplacer les connecteurs par des épissures et à ne pas négliger la propreté des connecteurs restant.

Après avoir présenté les choix et les limitations technologiques, nous pouvons conclure quant à l'élaboration du dispositif. Nous avons choisi la fibre optique, les sources lasers, et la cellule photovoltaïque à employer dans notre dispositif. Nous avons discuté sur les limitations technologiques dues à la forte puissance. Nous nous sommes intéressés uniquement aux longueurs d'ondes standards des télécommunications. D'une part, peu d'applications « fortes puissances » existent, donc peu de composants sont commercialement disponibles. D'autre part, la forte puissance peut engendrer des effets physiques susceptibles d'endommager la fibre optique et les connecteurs. À présent, et avant de présenter en détail l'architecture du dispositif tout-optique, nous devons nous intéresser aux effets générés par le comportement non-linéaire de la fibre optique, qui est l'élément central de notre application.

### 2.1.3. Description des phénomènes optiques

Nous nous intéressons à présent aux principaux phénomènes optiques qui peuvent surtout apparaître en présence de forte puissance lors de la propagation d'une ou de plusieurs ondes dans la fibre optique, et donc dans notre dispositif. En effet, la superposition des ondes optiques peut engendrer des phénomènes parasites et il faudra déterminer si la transmission des données pourra s'effectuer correctement en présence de la puissance.

Dans la suite, nous décrivons brièvement les origines et les principes de quelques processus physiques pouvant intervenir dans notre application, tels que les diffusions (Rayleigh, Brillouin ou Raman) et les principales non-linéarités (l'effet Kerr et ses conséquences, et le mélange à quatre ondes). Nous ne nous intéressons pas à d'autres phénomènes non-linéaires (génération de seconde et troisième harmoniques, absorption à deux photons, soliton optique), car leur impact est négligeable dans le cadre d'une transmission dans une fibre optique monomode longue de 10 km.

#### 2.1.3.a. Diffusion Rayleigh

La diffusion Rayleigh est une diffusion élastique, c'est-à-dire qu'il y a conservation d'énergie entre l'onde diffusée et l'onde incidente (Figure 2.9). Cette diffusion est due aux fluctuations de composition du matériau à l'échelle microscopique [Joindot 96]. La molécule du milieu possède des niveaux d'énergie vibrationnels. Les niveaux  $E_1$  et  $E_2$  sont représentés sur la Figure 2.9. Lorsque le photon incident interagit avec la molécule, cette dernière s'excite jusqu'à atteindre un niveau d'énergie virtuel, et reprend son état initial  $E_1$  en diffusant de façon spontanée un photon dont l'énergie est similaire à celui incident [Chluda 06]. Ce processus est extrêmement court et la diffusion a lieu dans toutes les directions.

La diffusion Rayleigh représente environ 90% de l'atténuation totale dans les fenêtres de transmission des télécommunications optiques et l'atténuation engendrée est proportionnelle à  $\lambda^{-4}$ , provoquant une augmentation de l'atténuation aux faibles longueurs d'ondes. Ce phénomène se produit tout au long de la propagation dans la fibre optique.

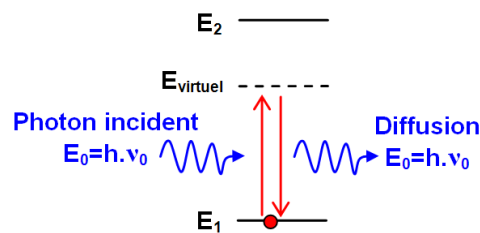


Figure 2.9 : Processus de diffusion élastique : exemple de la diffusion Rayleigh ( $h$  : constante de Planck,  $E$  : énergie,  $v_0$  : fréquence optique du photon).

#### 2.1.3.b. Diffusion Brillouin

La diffusion Brillouin est une diffusion inélastique, c'est-à-dire qu'un photon optique interagit avec un phonon acoustique du milieu, et engendre un photon diffusé, dont la fréquence est décalée par rapport à celle du photon incident. Ce décalage en fréquence dépend de l'énergie du phonon et du milieu d'interaction. Dans le cas général, lors de l'interaction entre le phonon et le photon incident, le décalage en fréquence peut être soustractif, nous parlons alors de décalage Stokes et dans ce cas une partie de l'énergie initiale des photons est perdue. Lorsque le décalage en fréquence est additif, nous parlons alors de décalage Anti-Stokes et une partie de l'énergie finale des photons est gagnée. Le mécanisme de ce processus

fait que la molécule absorbe le photon incident et atteint un niveau d'énergie virtuel, qu'elle quitte très rapidement ( $< 1$  ps) pour revenir à son état fondamental en diffusant de façon spontanée un photon [Stolen 08, Agrawal 01]. La Figure 2.10 présente d'une manière générale les processus de diffusions inélastiques spontanées, telle que la diffusion Brillouin.

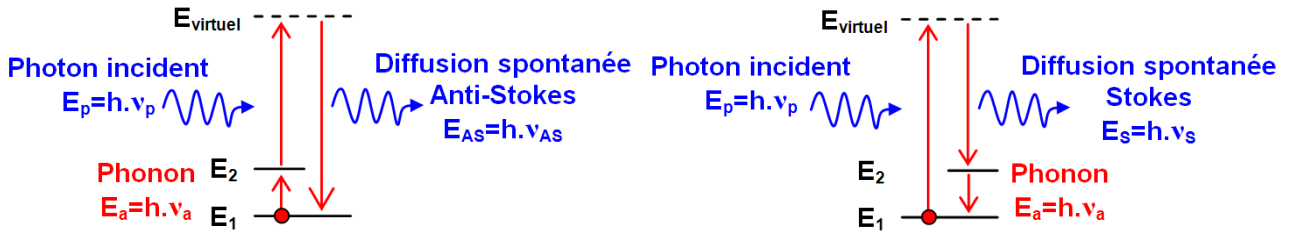


Figure 2.10 : Processus de diffusion spontanée Anti-Stokes (à gauche) et Stokes (à droite) ( $E_p$  : énergie de la pompe,  $E_a$  : énergie du phonon acoustique,  $E_{as}$  : énergie du photon anti-Stokes,  $E_s$  : énergie du photon Stokes,  $E_1$  : niveau d'énergie fondamentale de la molécule,  $E_2$  : niveau d'énergie vibrationnel de la molécule,  $E_{virtuel}$  : niveau d'énergie virtuel).

Dans une fibre optique, la diffusion Brillouin spontanée consiste en l'interaction d'un photon optique incident et d'un phonon acoustique. Des vibrations acoustiques (phonons), provenant des fluctuations thermiques de la fibre, se propagent le long de celle-ci et se comportent comme un réseau de Bragg dans la fibre. La diffusion Anti-Stokes est négligeable et le processus se résume donc à un décalage Stokes [Headley 05]. De plus, l'onde optique diffusée est contra-propagative à l'onde optique incidente (qualifiée d'onde pompe) [Kobyakov 10]. Dans le cas d'une fibre optique en silice (SMF-28), le décalage en fréquence est d'environ 11 GHz (diffusion Brillouin spontanée) et le gain Brillouin a une largeur de bande de l'ordre de 20 MHz pour une longueur d'onde incidente de 1550 nm [Joindot 96, Chluda 06, Stolen 08].

La diffusion est dite stimulée lorsqu'une onde optique supplémentaire (signal), dont la fréquence est proche de l'onde Stokes, interagit avec le phonon et un photon pompe (Figure 2.11). Les photons pompe constituent l'onde optique à l'origine de la diffusion spontanée. Dans le cas de la diffusion stimulée, la molécule est tout d'abord excitée par absorption d'un photon pompe. Mais avant de se recombinaison à un niveau d'énergie inférieur, la molécule interagit avec un photon signal. Puis, elle redescend au niveau fondamental en émettant deux photons signal identiques et un phonon acoustique. Les deux nouveaux photons possèdent une énergie, une direction, une polarisation et une phase identique au photon signal incident [Chluda 06].

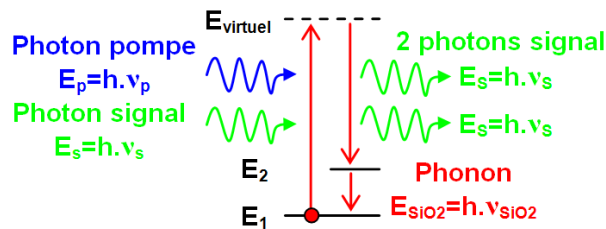


Figure 2.11 : Processus de la diffusion stimulée ( $E_p$  : énergie de la pompe,  $E_{SiO2}$  : énergie du phonon acoustique,  $E_s$  : énergie du photon signal,  $E_1$  : niveau d'énergie fondamentale de la molécule,  $E_2$  : niveau d'énergie vibrationnel de la molécule,  $E_{virtuel}$  : niveau d'énergie virtuel).

Le phénomène de diffusion Brillouin stimulée est caractérisé par le niveau de la puissance rétrodiffusée par l'onde Stokes, qui n'est pas négligeable. La diffusion stimulée provient d'un phénomène nommé électrostriction : l'onde pompe et l'onde Stokes (l'onde signal ici)

interagissent, engendrant alors des phonons acoustiques co-propagatifs à l'onde pompe. L'onde pompe interagit ainsi avec ces phonons acoustiques et avec l'onde Stokes, générant un effet en cascade. La Figure 2.12 présente le processus d'électrostriction associant la diffusion Brillouin spontanée et la diffusion Brillouin stimulée.

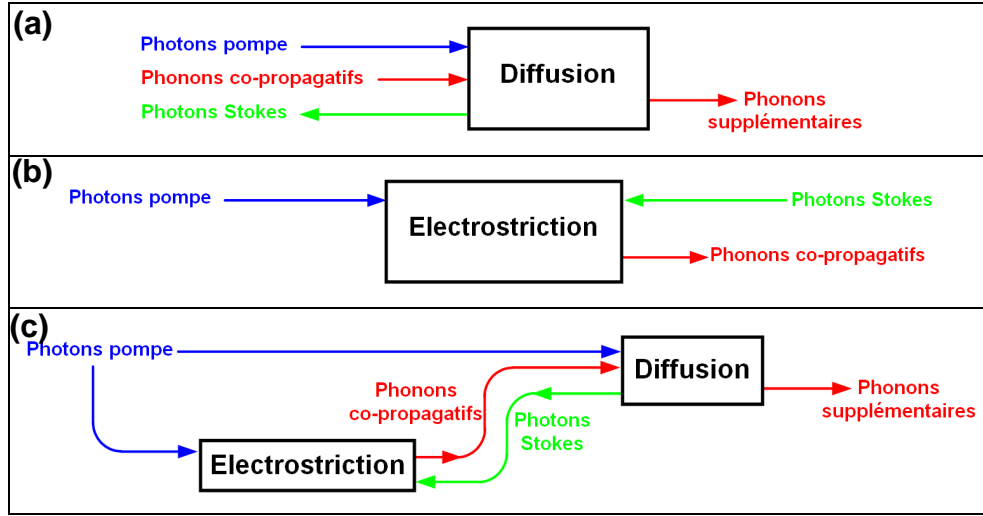


Figure 2.12 : Schéma du phénomène d'électrostriction associant la diffusion Brillouin spontanée et la diffusion Brillouin stimulée [Campillo 06] : (a) l'onde pompe interagit avec les vibrations du milieu et engendre une onde Stokes et des phonons supplémentaires ; (b) l'onde pompe et l'onde Stokes interagissent, ce qui engendre des phonons correspondant au décalage en fréquence Brillouin ; (c) les phénomènes de diffusion et d'électrostriction engendrent un effet cascade de ces mêmes phénomènes.

Il est possible de calculer la puissance seuil de la diffusion Brillouin stimulée (SBS : Stimulated Brillouin Scattering). La puissance seuil est définie comme étant la puissance incidente à partir de laquelle la puissance retournée est égale à la puissance transmise en sortie de la fibre. Cette puissance seuil est donnée par [Agrawal 02] :

$$P_{SBS\ seuil} = 21 \frac{A_{eff} \cdot \kappa_{SBS}}{g_{SBS} \cdot L_{eff}} \left( 1 + \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{SBS}} \right) \quad (2.1)$$

avec :

- $P_{SBS\ seuil}$  la puissance seuil de la diffusion Brillouin (W),
- $g_{SBS}$  le coefficient de gain Brillouin ( $m \cdot W^{-1}$ ), avec  $g_{SBS} = 1,68 \cdot 10^{-11} m \cdot W^{-1}$  dans le cas d'une fibre optique SMF-28 [Lanticq 08],
- $A_{eff}$  l'aire effective du cœur de la fibre optique, définie en pratique par l'aire réelle de la fibre optique ( $80 \mu m^2$ ),
- 21 facteur numérique propre à la fibre optique monomode en silice [Agrawal 02],
- $\kappa_{SBS}$  facteur de polarisation, égal à 3/2 dans le cas d'une fibre monomode,
- $\Delta\nu$  la largeur de bande à mi-hauteur de la source laser (Hz),
- $\Delta\nu_{SBS}$  la largeur de bande à mi-hauteur du spectre de gain Brillouin ( $\Delta\nu_{SBS} = 20$  MHz)
- $L_{eff}$  la longueur effective de la fibre optique, prenant en compte l'atténuation de l'onde pompe et définie par :

$$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha \quad (2.2)$$

- $L$  la longueur de la fibre optique (m)
- $\alpha$  le coefficient d'atténuation de la fibre optique ( $m^{-1}$ ),

Le terme  $(I + \Delta v / \Delta v_{SBS})$  est négligeable si la largeur à mi-hauteur de la raie laser est inférieure à la largeur à mi-hauteur du spectre de gain Brillouin (20 MHz) [Agrawal 01]. Dans le cas de notre application, la source laser des données ayant une largeur de bande à mi-hauteur de l'ordre de 2 MHz, nous nous trouvons dans cette configuration. Ainsi, pour  $L = 10$  km, la puissance de seuil calculée est égale à 20,4 mW (13,1 dBm) à 1480 nm, et 18,7 mW (12,7 dBm) à 1550 nm. Il est nécessaire que la puissance incidente soit inférieure à la puissance de seuil, afin que la puissance de l'onde Stokes soit faible par rapport à celle de l'onde pompe [Kung 97]. Les données ne seront pas gênées par ce phénomène car nous ne souhaitons pas émettre plus de 10 mW (10 dBm) en sortie de notre source laser à 1550 nm. Dans le cas de la puissance, nous établirons le seuil critique par la suite, quand nous connaîtrons les caractéristiques spectrales de la source optique employée dans notre dispositif.

### 2.1.3.c. Diffusion Raman

La diffusion Raman consiste en l'interaction entre un photon et un phonon optique du milieu [Joindot 96, Namiki 06]. Un phonon optique correspond aux vibrations individuelles de chaque élément d'une molécule, dont les fréquences se situent dans le domaine optique. Comme la diffusion Brillouin, il s'agit d'une diffusion inélastique dont le processus peut être expliqué par la Figure 2.10, en remplaçant le phonon acoustique par le phonon optique. La diffusion Raman spontanée se manifeste lorsqu'une onde dite onde pompe se propage seule dans le guide. Elle subit alors un décalage fréquentiel dit de Stokes. Ce décalage est dans le cas d'une fibre en silice égal à 13,2 THz [Namiki 06], fréquence propre à la silice (Figure 2.13). Ainsi l'effet Raman provoque essentiellement une transposition en longueur d'onde d'une partie de l'énergie optique. La diffusion Raman Anti-Stokes est plus faible de plusieurs ordres de grandeurs que la diffusion Raman Stokes [Chluda 06].

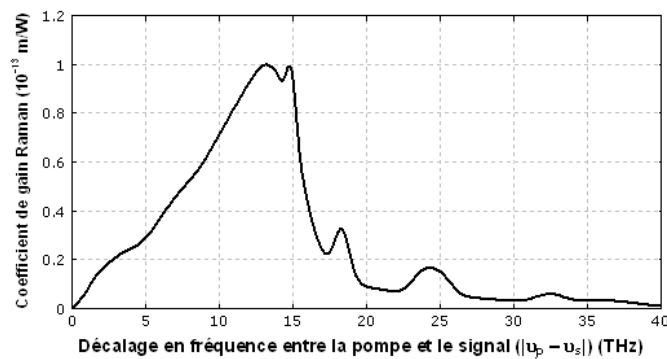


Figure 2.13 : Spectre du gain Raman pour la silice pour  $\lambda_{pompe} = 1 \mu m$  [Agrawal 01].

Il est possible d'utiliser cet effet pour amplifier un signal. On parle dans ce cas de la diffusion Raman stimulée [Chluda 06, Namiki 06, Keita 06, Jaouen 07, Bromage 04]. L'onde pompe est alors transmise simultanément avec une onde signal dans la fibre optique. Le processus est illustré sur la Figure 2.11, en remplaçant le phonon acoustique par le phonon optique. Le photon pompe et le photon signal interagissent via le matériau de la fibre, stimulant le processus de diffusion Raman. La molécule est alors excitée à un état d'énergie virtuel. Puis, elle se recombine au niveau fondamental en émettant deux photons signal clones et un phonon optique. Les deux nouveaux photons possèdent une énergie, une direction, une polarisation et une phase identique au photon signal incident.

Lors de la propagation dans une fibre, le phénomène est exponentiel car il se produit en chaîne. Le signal se retrouve alors amplifié. La diffusion Raman stimulée fonctionne en co- et en contra-propagation par rapport à la direction de l'onde pompe. D'après le relevé de R.H. Stolen (Figure 2.13) pour une fibre en silice, le gain Raman atteint son maximum à 13,2 THz d'écart entre la pompe et le signal, soit le décalage Stokes, et s'étend sur une plage de fréquences optiques proche de 5 THz. Nous nommons la longueur d'onde où se situe le maximum de gain, la longueur d'onde Stokes. Le gain Raman est d'ailleurs inversement proportionnel à cette longueur d'onde [Chluda 06], c'est-à-dire que le spectre de gain Raman a toujours la forme de la Figure 2.13 en fonction du décalage en fréquence. Mais les valeurs du spectre de gain Raman sont proportionnelles à la longueur d'onde Stokes, et dépendent donc de la longueur d'onde de la pompe. Pour calculer le gain maximum pour une autre longueur d'onde pompe, il existe une valeur très pratique du coefficient de gain Raman de  $1,0 \cdot 10^{-13} \text{ m.W}^{-1}$  pour  $\lambda_{\text{Stokes}} = 1000 \text{ nm}$  [Chluda 06]. Pour notre application, nous trouvons un gain Raman maximum de  $6,4 \cdot 10^{-14} \text{ m.W}^{-1}$  pour  $\lambda_{\text{Stokes}} = 1583,1 \text{ nm}$ .

La puissance transférée autour de la longueur d'onde Stokes par diffusion Raman spontanée, est ensuite amplifiée lors de la propagation dans la fibre par diffusion Raman stimulée : ce processus s'appelle l'ASE (Amplified Spontaneous Emission).

La puissance de seuil Raman est définie comme étant la puissance incidente pour laquelle la moitié de la puissance pompe est transférée vers l'onde Stokes par diffusion Raman stimulée. L'équation ci-après donne une excellente approximation de la puissance seuil :

$$P_{R \text{ seuil}} = 16 \frac{A_{\text{eff}}}{g_R \cdot L_{\text{eff}}} \quad (2.3)$$

avec :

$P_{R \text{ seuil}}$	la puissance seuil de la diffusion Raman (W),
$g_R$	le coefficient de gain Raman maximum ( $\text{m.W}^{-1}$ ), avec $g_R = 6,40 \cdot 10^{-14} \text{ m.W}^{-1}$ dans le cas d'une fibre optique SMF-28 avec $\lambda_p = 1480 \text{ nm}$ ,
$A_{\text{eff}}$	l'aire effective du cœur de la fibre optique, définie en pratique par l'aire réelle de la fibre optique ( $80 \mu\text{m}^2$ pour la SMF-28),
16	le facteur numérique propre à la fibre optique monomode en silice [Agrawal 02],
$L_{\text{eff}}$	la longueur effective de la fibre optique, prenant en compte l'atténuation de l'onde pompe.

D'après l'équation (2.3), nous trouvons que la puissance seuil Raman est égale à 2,71 W (34,33 dBm) dans le cas de notre application avec  $L = 10 \text{ km}$ .

Dans le cadre de notre dispositif expérimental, le phénomène de diffusion Raman stimulée aura une influence non négligeable, compte tenu des valeurs des longueurs d'ondes choisies pour l'énergie et les données. Les données seront amplifiées puisque le niveau de puissance du signal pompe sera de l'ordre du seuil Raman calculé. Par contre, la diffusion Raman spontanée sera une source de bruit : de la puissance sera transférée et engendrera de l'ASE autour de 1583 nm, correspondant à l'écart de 13,2 THz par rapport à la longueur d'onde de notre pompe (1480 nm).



### 2.1.3.d. Autres effets non-linéaires

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons aux autres principaux effets non-linéaires susceptibles d'intervenir lors de la propagation des ondes. Nous nous intéressons à l'effet Kerr optique et au mélange à quatre ondes.

L'effet Kerr optique se manifeste lorsqu'une onde laser impulsionnelle se propage au sein de la fibre, provoquant une variation de l'indice de réfraction du matériau en fonction de la puissance. L'effet Kerr est significatif dans le cas de la propagation d'impulsions ultracourtes (de l'ordre de la picoseconde). Cela peut induire soit un élargissement spectral de l'onde incidente, soit la génération de nouvelles impulsions à des fréquences proches dans le cas de systèmes comportant plusieurs canaux incidents [Stolen 08, Jaouen 07]. L'indice de réfraction étant dépendant au niveau temporel et fréquentiel, l'effet Kerr optique conduit à deux phénomènes [Agrawal 01] :

- l'auto-modulation de phase (SPM : Self Phase Modulation) : dans le cas d'une onde optique monochromatique, une impulsion optique subit une modulation de phase. Ce phénomène génère un décalage en fréquence [Agrawal 01]. Le phénomène de SPM reste toutefois négligeable sur des longueurs de fibre de l'ordre de la dizaine de kilomètres [Agrawal 01] ;
- la modulation de phase croisée (XPM : Cross Phase Modulation) [Bromage 04, Ho 02] : l'interaction de deux ondes optiques co-propagatives génère une modulation de phase d'une des ondes en fonction de l'amplitude de l'autre [Agrawal 01]. Ce phénomène dépend de la différence entre la puissance de l'onde principale et la puissance de l'onde modifiée. Il dépend également de l'écart en longueur d'onde, de la dispersion de vitesse de groupe, et de la polarisation des ondes [Headley 05]. Ce phénomène n'interviendra pas dans notre dispositif car la puissance des lasers de données est inférieure à la puissance seuil d'apparition de ce phénomène (de l'ordre de 79 mW) [Agrawal 01].

Le mélange à quatre ondes (FWM : Four Wave Mixing) est un phénomène non-linéaire où deux ondes optiques aux fréquences  $\nu_1$  et  $\nu_2$ , génèrent d'autres ondes optiques, aux fréquences optiques  $\nu_3 = 2.\nu_1 - \nu_2$  et  $\nu_4 = 2.\nu_2 - \nu_1$ . Si la longueur d'onde du minimum de dispersion de la fibre est proche des longueurs d'ondes des sources laser, ce mécanisme sera beaucoup plus grand car les deux ondes seront en phase [Bromage 04]. Tandis que dans le cas contraire, les deux ondes auront une différence de phase due à la dispersion chromatique induite lors de la propagation dans la fibre. Pour engendrer ce phénomène, il faut que les longueurs d'ondes des deux ondes soient très proches. Le FWM pourrait intervenir entre le signal descendant et le signal montant dans notre dispositif. Or, il n'est pas prévu que leurs longueurs d'ondes soient proches et donc nos deux ondes n'engendreront pas de FWM.

D'autre part, ce phénomène est aussi présent dans les dispositifs d'amplification Raman lorsque la longueur d'onde du minimum de dispersion se situe entre les longueurs d'ondes de la pompe et du signal co-propagatif [Bromage 04]. Le FWM se produit entre l'onde pompe et l'onde signal et génère alors de la puissance à des longueurs d'ondes autour du signal. Ce ne sera pas le cas dans notre système car le minimum de dispersion de la SMF-28 se situe à environ 1310 nm.

Nous pouvons désormais conclure quant à l'impact des principaux phénomènes décrits ci-avant. Pour résumer :

- la diffusion Rayleigh interviendra sur la puissance et les données comme source d'atténuation,
- la diffusion Raman amplifiera les données avec la longueur d'onde de la SLHP comme longueur d'onde pompe, mais générera de l'ASE,
- la diffusion Brillouin ne limitera pas la propagation des données, mais le fera pour la puissance, selon la largeur de bande optique de la source,
- l'effet Kerr, le SPM et le XPM sont négligeables sur une dizaine de kilomètres,
- le FWM n'interviendra ni entre les signaux descendants et montants, ni entre la puissance et les signaux.

Pour conclure, la prise en compte, à la fois des contraintes technologiques, et des phénomènes physiques pouvant être générés lors de la propagation d'un signal de puissance sur une fibre optique nous a conduit à faire des choix. Le support de transmission sélectionné est la fibre optique monomode pour ses avantages dans le cas des longues distances. La SLHP émet à la longueur d'onde de 1480 nm une puissance pouvant atteindre 5 W (37 dBm). Les données sont émises à 1550 nm avec une puissance de l'ordre de 1 mW (0 dBm). Cependant, la puissance émise par la SLHP et transmise dans le dispositif pose problème à cause du fort niveau requis. Afin de ne pas dégrader le dispositif, les composants doivent donc supporter cette forte puissance et nous devons également faire attention à la dégradation de la fibre en insérant des composants avec des épissures. Enfin, l'étude des phénomènes optiques a montré que, compte tenu de la forte puissance, des effets non-linéaires sont à surveiller et à évaluer lors de l'étude expérimentale.

Toutes les informations recueillies nous ont permis de mettre en place le dispositif expérimental. Nous allons maintenant présenter et caractériser les différents composants insérés dans le dispositif final.

## 2.2. Dispositif expérimental

### 2.2.1. Présentation du dispositif

Le dispositif expérimental est présenté sur la Figure 2.14. Il comporte différents composants spécifiques, choisis d'après les études menées au début de ce chapitre :

- une SLHP (Source Laser de Haute Puissance), émettant un signal optique continu, et capable de délivrer une puissance minimum de 5 W (37 dBm) à la longueur d'onde de 1480 nm ;
- un laser de données, émettant à 1550 nm les données optiques à transmettre vers le terminal ;
- une bobine de fibre monomode (SMF-28) de longueur 10 km ;
- deux multiplexeurs/démultiplexeurs en longueurs d'ondes (1480 nm et 1550 nm), appelés Mux/Démux, permettant de combiner ou séparer les différents signaux transportés par la fibre. La principale difficulté pour ce composant est de supporter une puissance optique importante (classiquement, les composants télécoms réalisant cette fonction supportent une puissance maximale de 500 mW) ;
- deux circulateurs pour séparer les données montantes et descendantes ;
- des cellules photovoltaïques pour réaliser la conversion O/E pour la puissance et deux photodétecteurs rapides avec une grande sensibilité pour la conversion O/E des données ;
- une source optique (laser de données) au niveau de l'instrument qui génère les données optiques à transférer vers la station terrestre ; cette source optique émet dans la bande C et doit être faiblement consommatrice afin de laisser le maximum de puissance utile pour l'instrument ;
- les connexions optiques sont réalisées par des épissures qui permettent de supporter beaucoup plus aisément les fortes puissances optiques mises en œuvre.

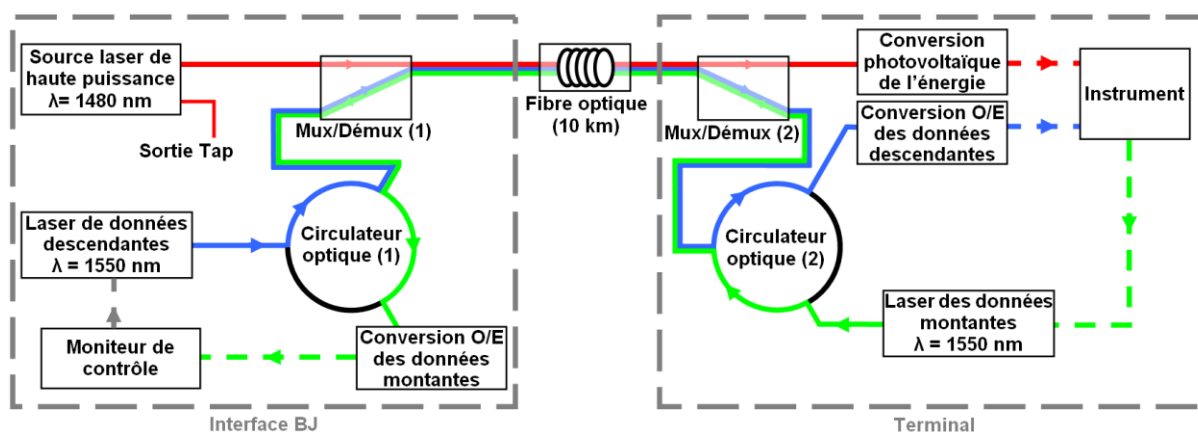


Figure 2.14 : Architecture retenue du dispositif de transmission de l'énergie et des données.

Nous décrivons par la suite de manière détaillée chaque source ou composant du dispositif expérimental, afin de connaître les caractéristiques de chacun (pertes, sensibilité en longueur d'onde, puissance supportée). Ce travail permet également de prévoir l'atténuation et les pertes subies par les ondes optiques lors de leur propagation dans le dispositif complet.

## 2.2.2. Conversion E/O

### 2.2.2.a. Source laser de haute puissance (SLHP)

La SLHP est un laser à amplification Raman de la société Keopsys, de modèle KPS-STD-BT-RFL-1480-10-FA, capable de délivrer une puissance optique de 10 W à la longueur d'onde de 1480 nm en continu [Keopsys 06]. Sa sortie optique est dirigée vers un coupleur, dont le rôle est de prélever une fraction de la puissance ( $\sim 1\%$ ) afin d'effectuer le monitoring de la sortie laser. Cette sortie, nommée Tap, délivre ainsi un signal atténué de 21 dB par rapport à la sortie principale. Cette sortie permet de contrôler la puissance en sortie du laser, et sert de référence pour la suite des mesures. Les deux sorties fibrées sont des fibres optiques monomodes. Deux modes de fonctionnement du laser sont possibles :

- le mode « contrôle en courant » (ACC) utile pour des puissances comprises entre 5 et 39 dBm ;
- le mode « contrôle en puissance » (APC) pour des puissances comprises entre 30 et 40 dBm.

Cette source laser est composée d'un laser pompe émettant à 1064 nm, d'une cavité formée par des réseaux de Bragg et d'une fibre optique servant de milieu amplificateur (Figure 2.15). L'onde pompe à 1064 nm subit des décalages Stokes successifs dans la cavité. Les différents réseaux de Bragg installés permettent cela car ils correspondent chacun à une longueur d'onde Stokes précise [Keita 06]. L'onde optique émise par la source laser correspond au sixième décalage Stokes de 1064 nm, soit 1480 nm.

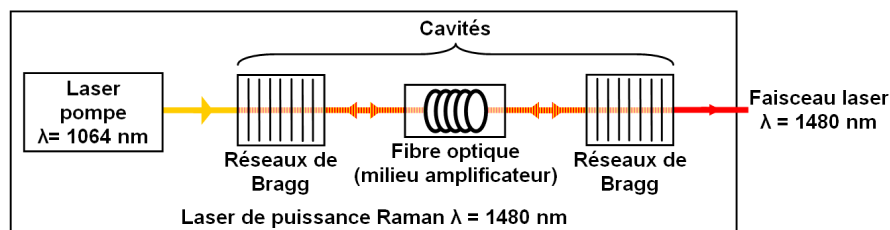


Figure 2.15 : Principe de fonctionnement d'un laser à amplification Raman.

La Figure 2.16 présente quatre spectres relevés en sortie de la SLHP pour différentes valeurs de puissance émise (30 dBm, 33 dBm, 36 dBm, et 40 dBm), dans la fenêtre comprise entre 1100 nm et 1650 nm. Ces mesures sont effectuées avec un analyseur de spectre optique dont la résolution est de 0,1 nm. Nous observons effectivement les décalages Stokes successifs à 1116,5 nm, 1174,2 nm, 1238,1 nm, 1309,5 nm, 1389,5 nm et enfin, l'ordre qui nous intéresse à 1480 nm. De plus, l'ordre suivant apparaît à 1583,1 nm lorsque la puissance émise à 1480 nm est environ égale à 40 dBm, et le premier ordre subit une déplétion pour contribuer à cette apparition. Les encadrés présents sur chaque spectre (Figure 2.16) indiquent la puissance intégrée autour de  $1480 \pm 10$  nm,  $1583 \pm 20$  nm et la puissance totale du spectre relevé.

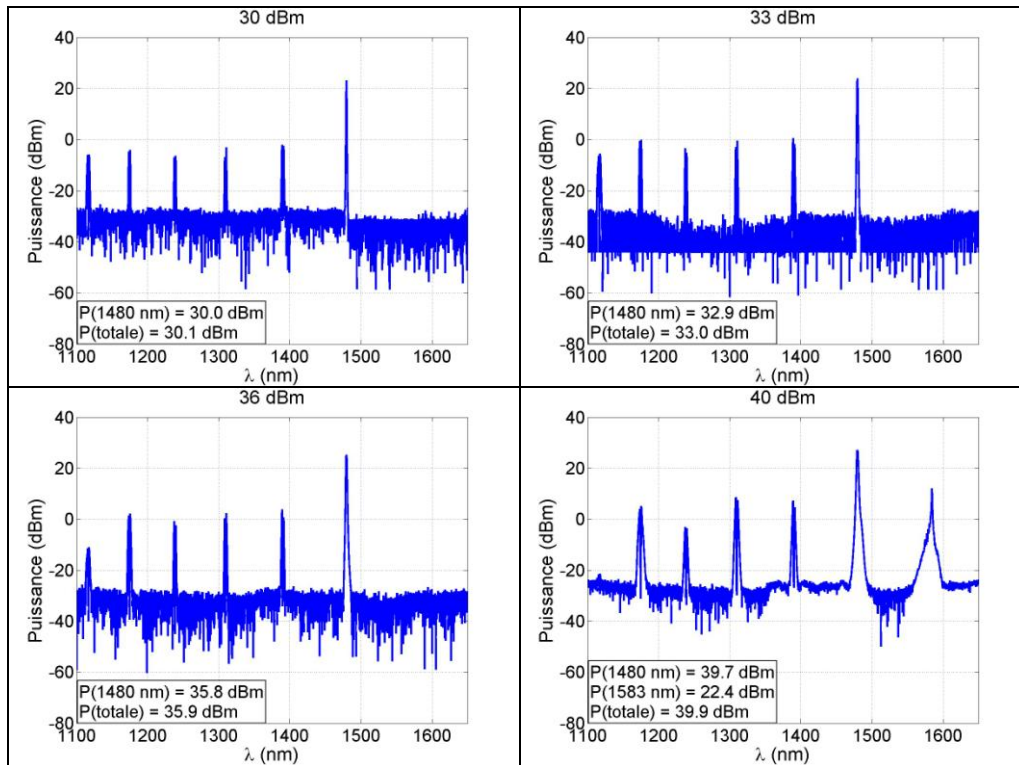


Figure 2.16 : Spectres relevés en sortie de la SLHP en fonction de la puissance émise (fenêtre comprise entre 1100 nm et 1650 nm).

La Figure 2.17 présente l'évolution de la puissance optique à  $1480 \pm 10$  nm, et à  $1583 \pm 20$  nm en fonction de la puissance totale délivrée par la SLHP. Nous constatons que le décalage de la puissance autour de 1583 nm est significatif lorsque la SLHP émet 40 dBm. Mais ce décalage produit un impact relativement négligeable sur la puissance à 1480 nm.

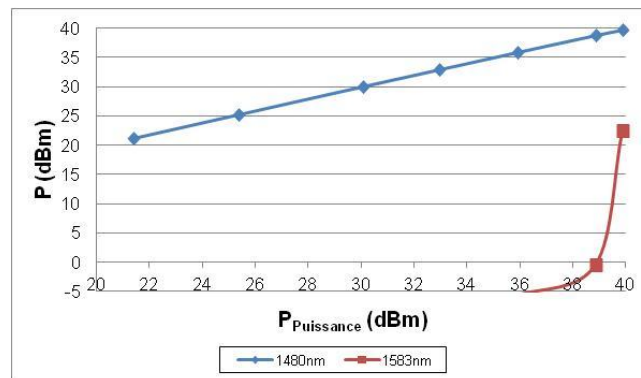


Figure 2.17 : Évolution de la puissance optique en sortie de la SLHP, autour de 1480 nm et de 1583 nm, en fonction de la puissance totale délivrée par la SLHP.

Nous souhaitons maintenant calculer le seuil d'apparition de la diffusion Brillouin stimulée dans le cas de cette source. Pour cela, nous relevons les spectres optiques entre 1450 nm et 1650 nm, là où se trouve l'énergie. L'analyse de ces spectres nous renseigne sur l'évolution de la largeur du pic autour de 1480 nm. La Figure 2.18 présente quelques spectres relevés en sortie de la SLHP en fonction de la puissance émise dans la fenêtre comprise entre 1450 nm et 1650 nm, ainsi qu'un zoom sur le pic à 1480 nm.

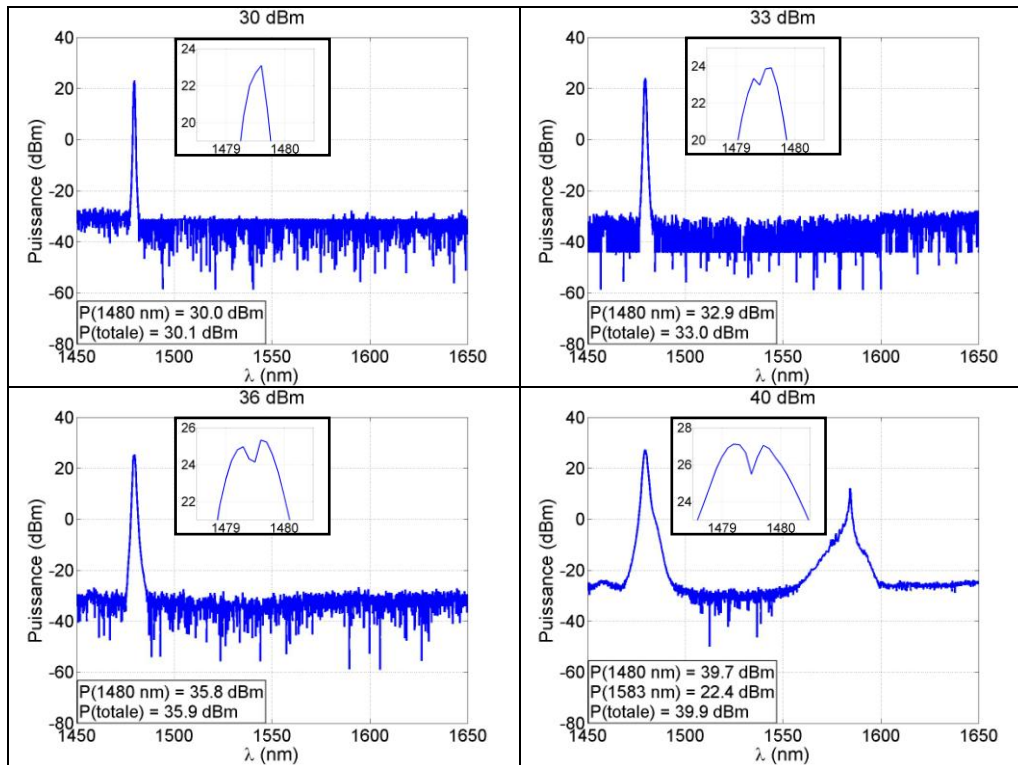


Figure 2.18 : Spectres relevés en sortie de la SLHP en fonction de la puissance émise (fenêtre comprise entre 1450 nm et 1650 nm avec un zoom autour de 1479,5 nm).

Nous constatons que la largeur du pic à 1480 nm augmente en fonction de la puissance émise. Nous représentons l'évolution de la largeur à mi-hauteur sur la Figure 2.19 en fonction de la puissance.

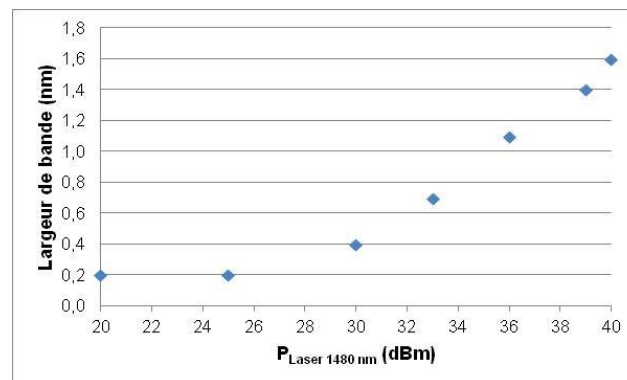


Figure 2.19 : Évolution de la largeur de bande à mi-hauteur en fonction de la puissance émise par la SLHP.

Nous obtenons une largeur de raie maximale de 1,6 nm, qui est plus faible que la largeur de bande maximale donnée par le constructeur : 2 nm. À partir de ces résultats, nous pouvons calculer la puissance du seuil d'apparition de la diffusion Brillouin avec l'équation (2.1). Nous présentons sur la Figure 2.20 l'évolution de la puissance de seuil en fonction de la puissance de la SLHP. Chaque point correspond à une valeur différente de la largeur de bande spectrale à mi-hauteur de la source (qui évolue selon la Figure 2.19).

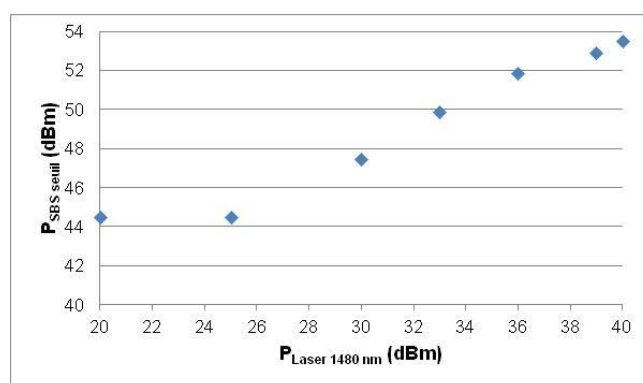


Figure 2.20 : Puissance de seuil d'apparition de la diffusion Brillouin en fonction de la puissance émise par la SLHP.

Nous observons que la puissance de seuil est toujours supérieure, de plus de 10 dB, à la puissance délivrée par notre SLHP. Ceci est dû à l'élargissement de la raie laser à mesure que la puissance augmente. Nous n'atteindrons donc pas la puissance de seuil d'apparition de la diffusion Brillouin avec notre dispositif et ce phénomène n'interviendra donc pas dans la suite.

### 2.2.2.b. Lasers de données

Nous utilisons principalement un laser de données de type DFB (Distributed FeedBack) qui émet dans la bande C (1530-1570 nm) à la longueur d'onde de 1549,5 nm. Nous noterons toujours dans la suite que cette source émet à 1550 nm. Le signal est modulé par un modulateur externe de type Mach-Zehnder inséré entre le laser et le circulateur. La puissance maximale du laser est de 30 mW. La Figure 2.21 montre le spectre du laser pour une puissance émise de 10 dBm. La puissance notée dans l'encadré est relevée à  $1549,5 \pm 0,5$  nm. Nous montrons également un zoom du pic à 1549,5 nm.

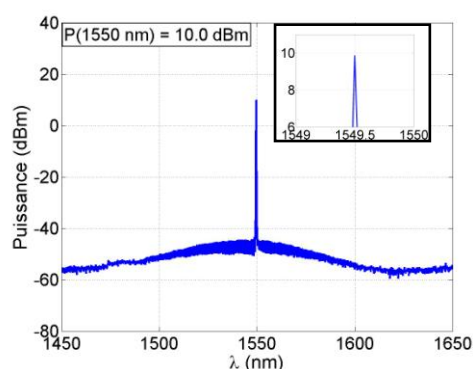


Figure 2.21 : Spectre du laser DFB à 1550 nm, pour une puissance de 10 dBm (dans une fenêtre comprise entre 1450 nm et 1650 nm avec un zoom autour de 1550 nm).

Cette source sera utilisée dans toutes les configurations suivantes :

- superposition de la puissance et des données descendantes, en tant que source de données descendantes ;
- superposition de la puissance et des données montantes, en tant que source de données montantes ;

- superposition de la puissance et des données montantes et descendantes, en tant que source de données descendantes.

Dans ce dernier cas, lorsque deux sources lasers seront nécessaires, nous utiliserons une autre source laser pour les données montantes. Lors de la phase de caractérisation en régime statique, nous avons opté pour une source accordable Photonetics Tunics, couvrant la plage de 1540 nm à 1620 nm. La longueur d'onde de cette source sera fixée à 1551 nm et correspondra à celle du laser faiblement consommant prévu pour la version finale du prototype. Cette source est capable d'émettre -3 dBm sur l'ensemble de la plage, et atteint un maximum de 0 dBm autour de 1580 nm.

Lors de la phase de caractérisation en régime dynamique, la source laser de données montantes sera un laser DFB disponible au laboratoire, émettant à la longueur d'onde de 1543,5 nm. De même que la première source laser, cette seconde source est modulée de façon externe avec un modulateur de type Mach-Zehnder, et est capable d'émettre une puissance maximale de 30 mW. La forme de son spectre est identique à celle de la première source.

Il est important de rappeler que les sources présentées ici ne sont pas les sources définitives prévues pour le prototype, mais des sources choisies pour tester le dispositif expérimental et valider le concept.

### **2.2.3. Composants**

#### **2.2.3.a. Fibre optique et connectique**

La fibre optique utilisée est une fibre monomode SMF-28 de la société Corning, longue de 10 km. Elle possède une atténuation de 0,2 dB/km à la longueur d'onde de 1550 nm, et une atténuation de 0,28 dB/km à la longueur d'onde de 1480 nm.

Les connexions entre la SLHP, les Mux/Démux, les coupleurs et la fibre sont toutes réalisées par des épissures. Ceci est, rappelons-le, indispensable pour diverses raisons :

- tout d'abord, les connecteurs standard (FC) habituellement utilisés dans les communications optiques sont certifiés uniquement jusqu'à une puissance de 2 W ;
- d'autre part, comme il a été mentionné dans le chapitre précédent, les problèmes de salissures de fibres peuvent compromettre la qualité des mesures, voire même engendrer une destruction des composants par fusion des fibres (fiber fuse) [Schuto 04].

#### **2.2.3.b. Circulateur**

Le circulateur a pour but de séparer les flux de données montantes et descendantes de chaque côté du dispositif. Ce composant est constitué de 3 ports et permet aux ondes optiques de circuler dans un seul sens : du port 1 vers le port 2, et du port 2 vers le port 3 (Figure 2.22). La voie 2 est connectée dans notre dispositif à la fibre optique longue de 10 km, via le Mux/Démux.



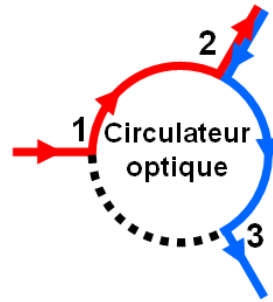


Figure 2.22 : Schéma de fonctionnement du circulateur.

Nous avons à notre disposition deux circulateurs de large bande passante (bande C, bande L) de chez OZ Optics. Le Tableau 2.1 résume leurs pertes d'insertion à 1550 nm, tandis que la Figure 2.23 présente leur caractérisation en longueur d'onde du port 1 vers le port 2, et du port 2 vers le port 3. Le circulateur (1) est situé à l'entrée du dispositif et le circulateur (2) se situe au niveau de l'instrument (Figure 2.14).

			Circulateur (1)	Circulateur (2)
Bande passante			1520~1620 nm	
@ 1550 nm	Pertes d'insertion	Port 1→2	0,7 dB	1,4 dB
		Port 2→3	0,6 dB	0,7 dB
	Isolation	Port 1→3	60,1 dB	57,1 dB
		Port 2→1	51,4 dB	50,9 dB
		Port 3→1	62,2 dB	63,9 dB
		Port 3→2	53,9 dB	51,8 dB

Tableau 2.1 : Principales caractéristiques des circulateurs.

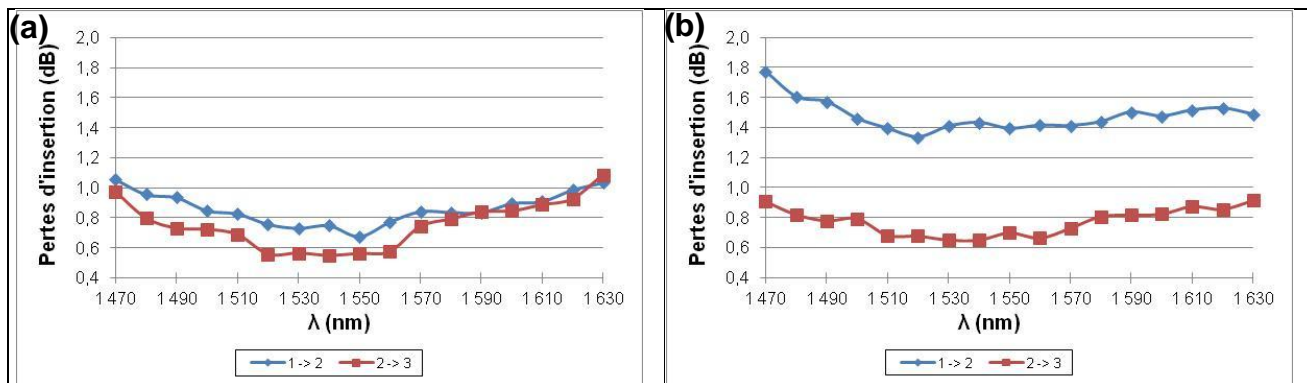


Figure 2.23 : Caractérisation en longueur d'onde (a) du circulateur (1) et (b) du circulateur (2).

Nous constatons que les pertes d'insertion varient peu en fonction de la longueur d'onde. Cependant, le circulateur situé en sortie du dispositif présente davantage de pertes sur la liaison 1 vers 2.

### 2.2.3.c. Multiplexeur/Démultiplexeur

Les multiplexeurs/démultiplexeurs combinent ou séparent des ondes optiques de longueur d'onde différentes dans une fibre optique. Nous avons choisi pour notre application des composants fonctionnant dans les gammes 1475-1485 nm (puissance) et 1545-1555 nm

(données). La Figure 2.24 présente leur fonctionnement, et le Tableau 2.2, leurs principales caractéristiques. Le Mux/Démux (1) est utilisé en multiplexeur (en entrée de fibre) et le Mux/Démux (2) est utilisé en démultiplexeur (en sortie de fibre).

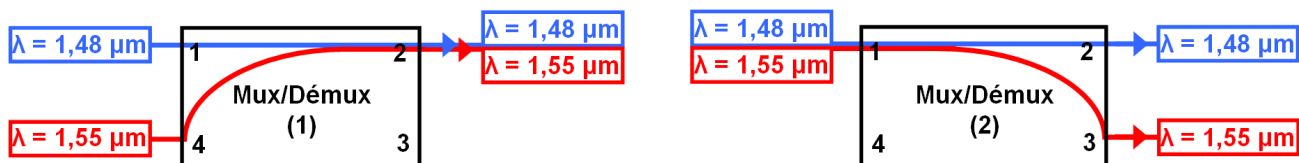


Figure 2.24 : Schéma de fonctionnement du Mux/Démux 1480nm / 1550nm.

		Mux/Démux (1)		Mux/Démux (2)	
Bande passante		1475~1485 nm, 1545~1555 nm			
@ 1480 nm	Pertes d'insertion	Port 1 → 2	0,3 dB	Port 1 → 2	0,3 dB
	Isolation	Port 1 → 3	18,6 dB	Port 1 → 3	33,1 dB
@ 1550 nm	Pertes d'insertion	Port 4 → 2	0,2 dB	Port 1 → 3	0,3 dB
	Isolation	Port 4 → 3	24,4 dB	Port 1 → 2	31,7 dB
Puissance maximale		5 W (37 dBm)			

Tableau 2.2 : Principales caractéristiques des Mux/Démux.

La caractérisation de la SLHP (§2.2.2.a) sur la transmission de la puissance a fait apparaître un transfert de puissance significatif autour de la longueur d'onde 1583 nm pour une puissance de la SLHP supérieure à 38 dBm. Il est donc indispensable de caractériser le comportement du Mux/Démux au voisinage de cette longueur d'onde. La Figure 2.25 présente le comportement du Mux/Démux (2) en fonction de la longueur d'onde du signal injecté sur l'entrée 1. Le Mux/Démux (1) possède un comportement similaire.

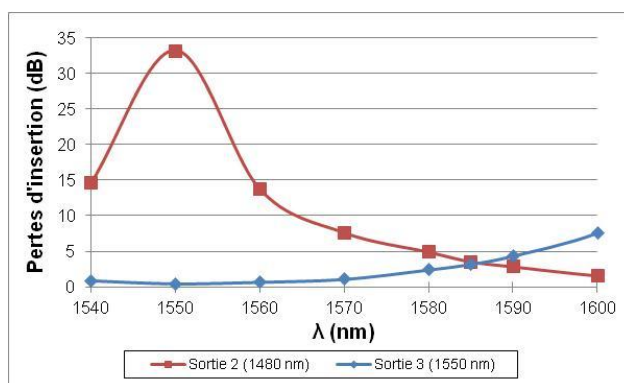


Figure 2.25 : Caractérisation en longueur d'onde du Mux/Démux (2).

Au regard de cette caractérisation, nous notons que, pour une longueur d'onde de 1583 nm, environ la moitié de la puissance est envoyée dans la voie 2 et l'autre partie dans la voie 3. Donc une part non négligeable de la puissance générée par effet Raman et présente à cette longueur d'onde se superposera aux données descendantes. Nous sommes donc dans l'obligation de tenir compte de ce transfert d'énergie pour l'architecture située au niveau du terminal.

Il nous reste à étudier le dispositif de conversion O/E de l'énergie qui doit lui aussi être optimisé pour obtenir le meilleur rendement de conversion O/E. Nous évaluerons d'ailleurs l'impact de ce transfert d'énergie sur le rendement.

## 2.2.4. Conversion O/E

L'énergie optique transportée sur notre extension doit être convertie en énergie électrique pour alimenter l'instrument (Figure 2.14). La conversion de la puissance optique en puissance électrique est réalisée par une cellule photovoltaïque. Il existe peu de composants sur le marché capables de convertir une puissance optique incidente supérieure à quelques dBm. Le fabricant JDSU réalise des recherches sur l'alimentation optique depuis le début des années 2000 [WERTHEN 05], et produit donc des composants permettant de résoudre partiellement notre problématique. Notre choix s'est porté sur leur cellule photovoltaïque PPC-9LW.

Cette cellule est conçue pour recevoir l'énergie optique issue d'une fibre monomode. Elle est optimisée pour fonctionner sur la bande passante 1310-1500 nm. Le signal électrique délivré peut atteindre une tension de 4 V et une puissance de 100 mW. Le rendement de conversion peut atteindre environ 25% dans cette bande passante [Werthen 05] selon les données du constructeur. La Figure 2.26 présente les caractéristiques, fournies par le constructeur, en tension, en courant et en puissance électrique de cette cellule photovoltaïque, pour deux puissances optiques incidentes. Nous observons que le fonctionnement est optimal si la tension est entre 3,5 V et 4 V. Dans ces conditions, la puissance électrique recueillie est égale à 25 mW lorsque la puissance optique incidente est égale à 100 mW. Donc, nous retrouvons effectivement un rendement de conversion O/E de 25%.

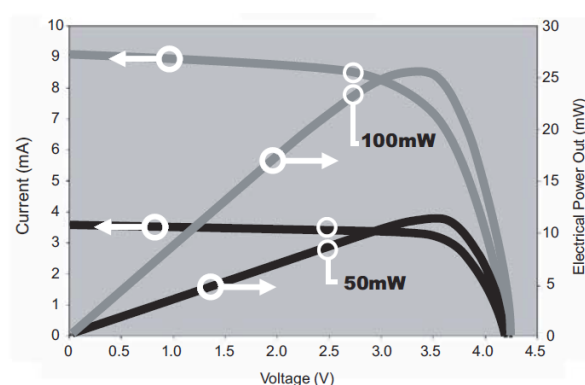


Figure 2.26 : Caractéristiques en tension, en courant et en puissance électrique de la cellule photovoltaïque pour deux puissances optiques incidentes (50 mW et 100 mW) [JDSU 06b].

Dans la suite, nous caractérisons la cellule photovoltaïque afin de connaître son comportement en fonction de divers paramètres : le but est d'obtenir le maximum d'énergie électrique disponible au niveau du terminal.

À partir de ces informations, nous concluons ensuite sur les meilleures conditions d'utilisation dans notre dispositif. Nous décrivons donc les adaptations réalisées sur le module de conversion O/E inséré dans notre dispositif expérimental.

### 2.2.4.a. Caractérisation de la cellule photovoltaïque

Le rendement de conversion d'une cellule photovoltaïque dépend de plusieurs paramètres. Nous pouvons citer :

- la charge résistive ;
- la longueur d'onde incidente ;
- la température ;
- la puissance optique incidente.

Dans l'objectif d'utiliser la PPC dans les meilleures conditions, c'est-à-dire avec un rendement O/E maximum, il est important de la caractériser en fonction de ces différents paramètres en termes de rendement de conversion.

#### i. Influence de la charge résistive

De manière à obtenir le meilleur rendement de conversion en fonction de la puissance du signal optique incident, nous avons cherché expérimentalement la valeur de la résistance de charge optimale. Pour cela, nous avons fait varier la charge de la cellule photovoltaïque jusqu'à obtenir la puissance électrique la plus élevée au travers de la mesure du courant et de la tension. La Figure 2.27 présente le schéma de principe. Le faisceau optique incident possède une longueur d'onde de 1480 nm. La cellule n'est pas régulée en température et elle est placée dans un environnement dont la température ambiante est de 20°C. D'une manière générale, le rendement optique-électrique d'une cellule photovoltaïque varie fortement en fonction de la température. Ici, nous avons fait le choix d'une dissipation de chaleur à l'aide d'un radiateur fixé sur la cellule photovoltaïque, sans dispositif de régulation en température.

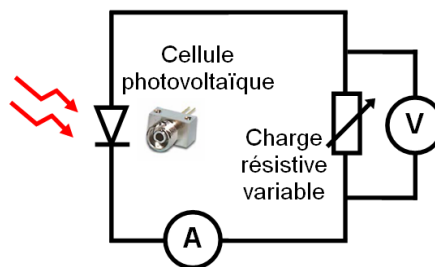


Figure 2.27 : Schéma de principe de la caractérisation en rendement en fonction de la charge résistive.

La Figure 2.28 montre l'évolution du rendement de conversion énergétique en fonction de la puissance optique incidente. Chaque mesure correspond à la valeur optimale de la résistance de charge. Par exemple, pour une puissance optique incidente de 17 dBm, nous devons utiliser une résistance de charge de 880  $\Omega$  afin d'obtenir un rendement maximal de 26,6%. Alors que pour une puissance de 30 dBm, la résistance de charge doit être de 41  $\Omega$  pour obtenir 11,6% de rendement maximum.

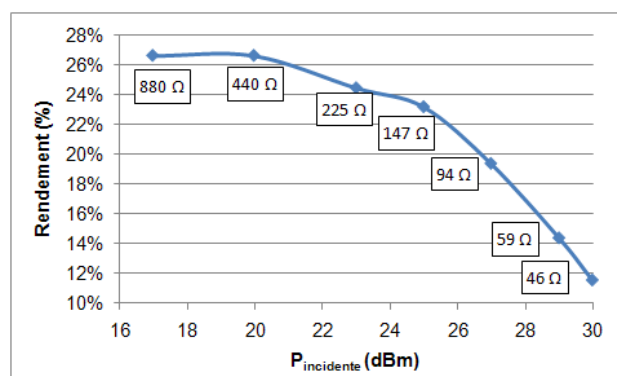


Figure 2.28 : Évolution du rendement de conversion en fonction de la puissance optique incidente ( $\lambda = 1480$  nm) avec optimisation de la résistance de charge.

Les résultats présentés sur la Figure 2.28 montrent que le rendement de la cellule photovoltaïque dépend de la puissance optique incidente. De 17 dBm à 25 dBm, le rendement

de conversion diminue de 3%, puis il chute de manière plus importante au-delà de 25 dBm. La valeur de la résistance de charge optimale diminue à mesure que la puissance optique augmente. L'utilisation de faisceaux optiques de forte puissance nous oblige donc à fixer des valeurs de résistance faibles (Figure 2.29). Ainsi, la résistance du circuit de charge de la cellule photovoltaïque, ici modélisée par la résistance  $R$ , devra présenter une résistance de valeur bien déterminée, en fonction de la puissance optique incidente choisie dans la version finale du prototype.

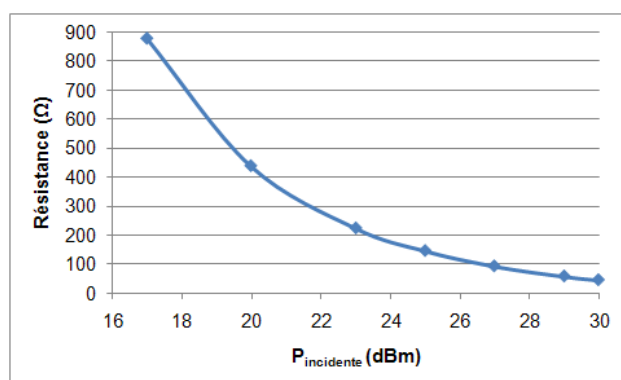


Figure 2.29 : Évolution de la valeur optimale de la résistance de charge en fonction de la puissance optique incidente de manière à obtenir le rendement de conversion le plus élevé.

Pour utiliser de manière optimale ce composant PPC-9LW, nous sommes donc obligés de limiter la puissance optique incidente à une puissance inférieure à 30 dBm, car nous atteignons la limite de la puissance supportée par la cellule. De plus, la puissance incidente doit être stable car il est nécessaire d'ajuster la résistance pour optimiser le rendement de conversion O/E.

## ii. Sensibilité en longueur d'onde

Nous verrons dans le chapitre 3 que lorsqu'une onde optique de puissance supérieure à 27 dBm se propage le long de la fibre optique, un phénomène d'élargissement du spectre optique, ainsi qu'un décalage Stokes sont observés. Le décalage Stokes génère de l'ASE autour de 1583 nm pour une longueur d'onde d'émission correspondant à 1480 nm.

Un spectre optique non-monochromatique éclairera donc la cellule. Il est donc important de connaître le rendement de la cellule photovoltaïque en fonction de la longueur d'onde incidente. Nous avons à notre disposition deux sources accordables, nous permettant de mesurer la sensibilité de la cellule photovoltaïque sur une plage spectrale de 1470 nm à 1620 nm (Figure 2.30). La première source employée est une source Agilent. Elle couvre la plage de longueur d'onde de 1470 nm à 1570 nm. La seconde est une source Photonetics Tunics, couvrant la plage de longueur d'onde de 1560 nm à 1620 nm. Ces sources accordables peuvent fournir une puissance optique maximale égale à 3 dBm sur l'intégralité de leurs plages spectrales respectives. La résistance de charge est donc fixée à 16 kΩ, qui est la valeur optimale obtenue pour cette puissance de 3 dBm à 1480 nm.

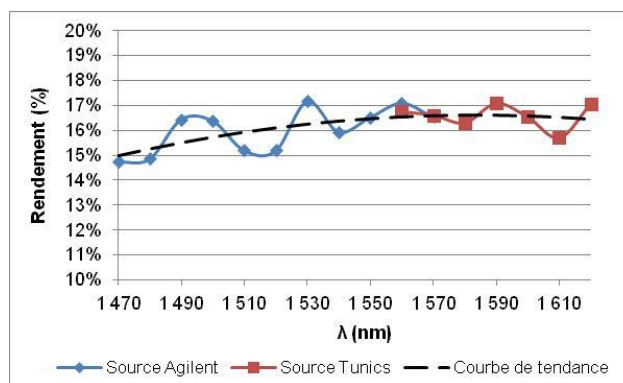


Figure 2.30 : Évolution du rendement de conversion en fonction de la longueur d'onde ( $P_{incident} = 3 \text{ dBm}$ ,  $R = 16 \text{ k}\Omega$ ).

Dans ces conditions expérimentales, le rendement évolue autour de 16% sur la plage de longueur d'onde allant de 1470 nm jusqu'à 1610 nm. Dans notre application, l'énergie décalée dans la bande spectrale supérieure par la diffusion Raman sera par conséquent bien convertie en énergie électrique sans chute notable du rendement de la cellule photovoltaïque. Par ailleurs, il faut noter que le rendement de conversion dans les conditions expérimentales de la Figure 2.30 reste faible. Ceci est dû au fait que la puissance optique incidente est relativement basse et ne permet donc pas d'utiliser la cellule photovoltaïque dans ses conditions optimales, c'est-à-dire avec une puissance supérieure à la centaine de milliwatts optique.

### iii. Sensibilité à la température

Les puissances optiques incidentes élevées sur la cellule photovoltaïque sont susceptibles d'augmenter significativement la température de celle-ci. Il se révèle donc nécessaire d'étudier son comportement en fonction de la température.

Pour cela, la cellule photovoltaïque a été installée avec un dispositif de régulation en température (Figure 2.31 et Figure 2.32) constitué d'un module Peltier, refroidissant le composant, et d'un radiateur, évacuant la chaleur. Une thermorésistance, en contact direct avec la cellule photovoltaïque, mesure sa température.

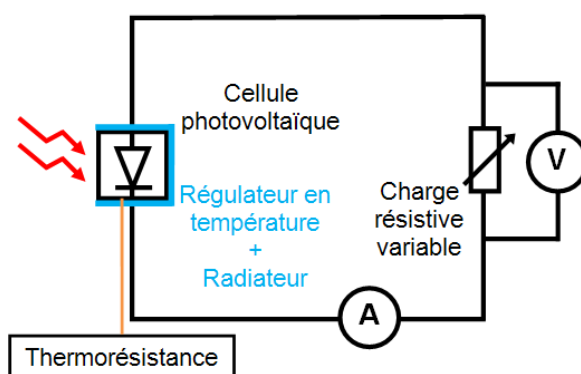


Figure 2.31 : Schéma du montage de régulation en température pour la cellule photovoltaïque.



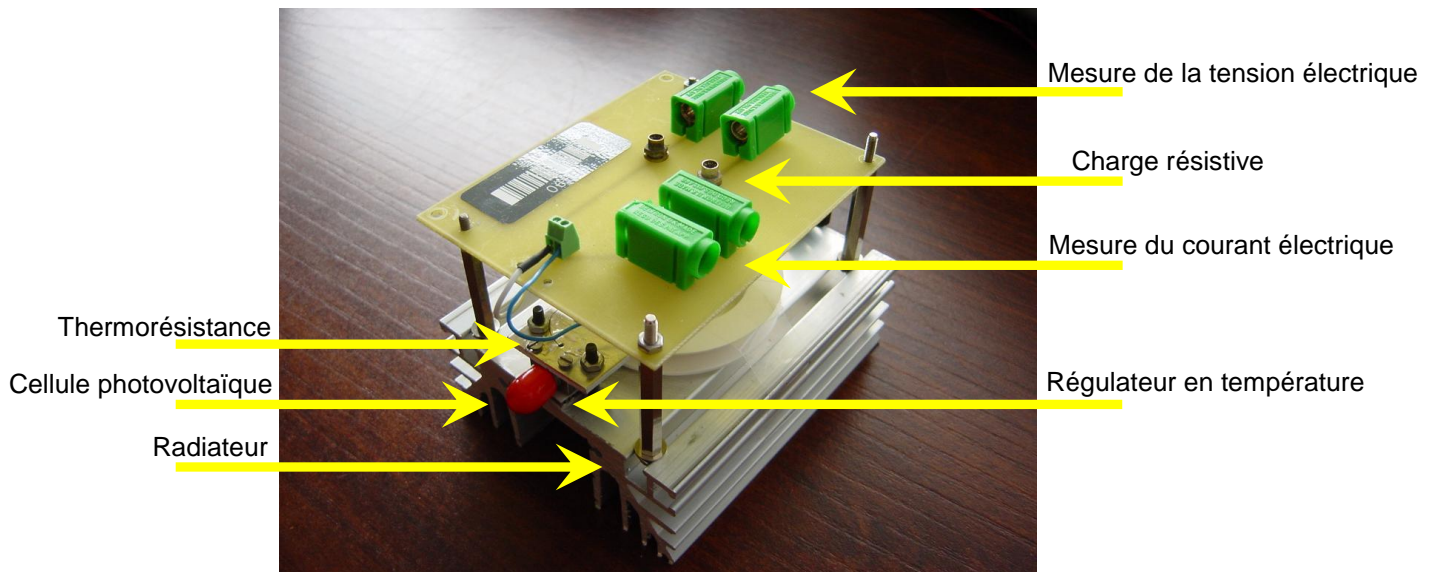


Figure 2.32 : Montage de régulation en température pour la cellule photovoltaïque.

La Figure 2.33 présente l'évolution du rendement de conversion en fonction de la température de régulation et de la puissance optique incidente. La consigne en température varie entre 16°C et 28°C et la puissance incidente est émise de 17 dBm à 30 dBm. Les mesures réalisées dans le cas où nous ne régulons pas la température (Figure 2.33(b)), correspondent aux mesures déjà présentées sur la Figure 2.28.

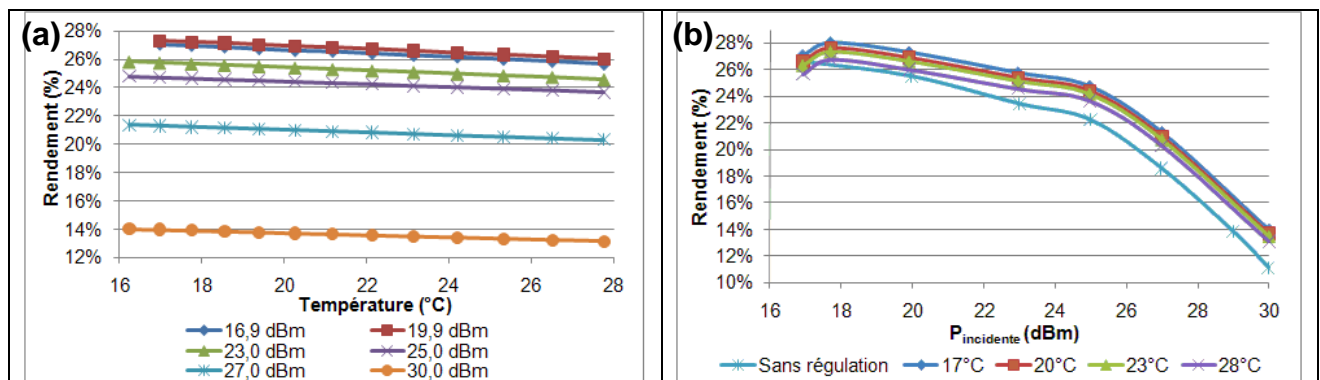


Figure 2.33 : Évolution du rendement de conversion en fonction (a) de la température de régulation, pour différentes puissances optiques incidentes et (b) de la puissance optique incidente, pour différentes températures de régulation. La résistance de charge est optimisée pour chaque valeur de puissance incidente.

D'après la Figure 2.33, il apparaît que les performances de conversion de la cellule photovoltaïque sont meilleures à basse température. Cependant, sur la plage explorée, la variation de rendement est de l'ordre de seulement 1% quelle que soit la puissance optique incidente. La régulation en température n'est donc pas une solution satisfaisante car beaucoup trop coûteuse en terme énergétique au regard de l'amélioration des performances. Dans le cas de l'absence de régulation, il faut préciser que la cellule photovoltaïque est tout de même montée sur un radiateur (dissipation passive de l'énergie). De plus, dans le cadre de notre application, le terminal contenant la cellule photovoltaïque sera située en milieu marin, où la température ambiante est relativement faible et stable (environ 0°C). La température du milieu marin sera donc sur ce point bénéfique pour notre application.

### 2.2.4.b. Dispositif de conversion

Comme le montre l'étude du §2.2.4.a, les performances de la cellule photovoltaïque sélectionnée sont optimales pour une puissance optique de l'ordre de 20 dBm. Or, dans le cadre de notre application, la puissance optique à convertir sera supérieure ou égale à 30 dBm. Il faut donc optimiser la conversion en concevant un dispositif associant plusieurs cellules photovoltaïques. Nous allons donc réduire la puissance incidente en la partageant à l'aide d'un coupleur et la diriger vers plusieurs cellules photovoltaïques reliées électriquement.

#### i. Simulations

Le choix du fractionnement (appelé couplage dans la suite) optimal passe par la détermination du rendement optique-électrique maximal, défini comme étant le rapport entre l'énergie électrique totale disponible en sortie des diodes photovoltaïques et l'énergie incidente délivrée par le laser de puissance.

À partir de la caractérisation de la cellule photovoltaïque et connaissant l'atténuation de la fibre et les pertes des différents composants (Figure 2.34), nous avons déterminé la puissance optique en sortie de chaque voie du coupleur. Les valeurs des pertes d'insertion du coupleur sont celles que l'on trouve classiquement chez les fabricants. Nous pouvons ainsi calculer la puissance électrique et le rendement obtenu en fonction de la puissance optique émise par le laser de puissance pour différents coefficients de couplage (Figure 2.35). Nous choisissons de comparer la valeur du rendement et de la puissance électrique convertie pour trois types de coupleurs possédant un coefficient de couplage de 3 dB (1 vers  $N = 2$  voies), de 6 dB (1 vers  $N = 4$  voies) ou de 9 dB (1 vers  $N = 8$  voies). Le calcul du rendement prend en compte le coupleur à  $N$  voies et le rendement de conversion des diodes photovoltaïques. Pour ces calculs, nous considérons un comportement uniforme des cellules photovoltaïques. Le rendement est calculé en faisant le rapport de la somme de la puissance électrique convertie par les cellules et de la puissance incidente sur l'entrée du coupleur. Les résultats expérimentaux présentés sur la Figure 2.28 sont exploités pour calculer le rendement de conversion O/E de notre simulation. En ce qui concerne le calcul de la valeur de la puissance électrique, il ne prend pas en compte les pertes d'insertion du Mux/Démux à 1583 nm avec le décalage Stokes.

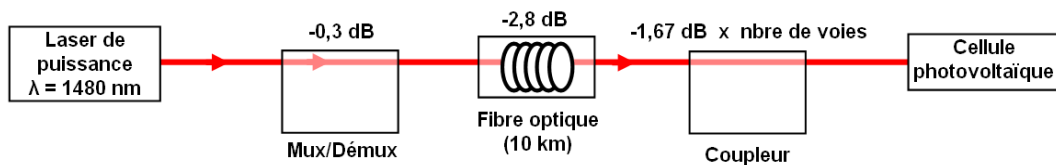


Figure 2.34 : Paramétrage du dispositif utilisé pour les simulations avec l'atténuation et les pertes d'insertion de chaque composant.



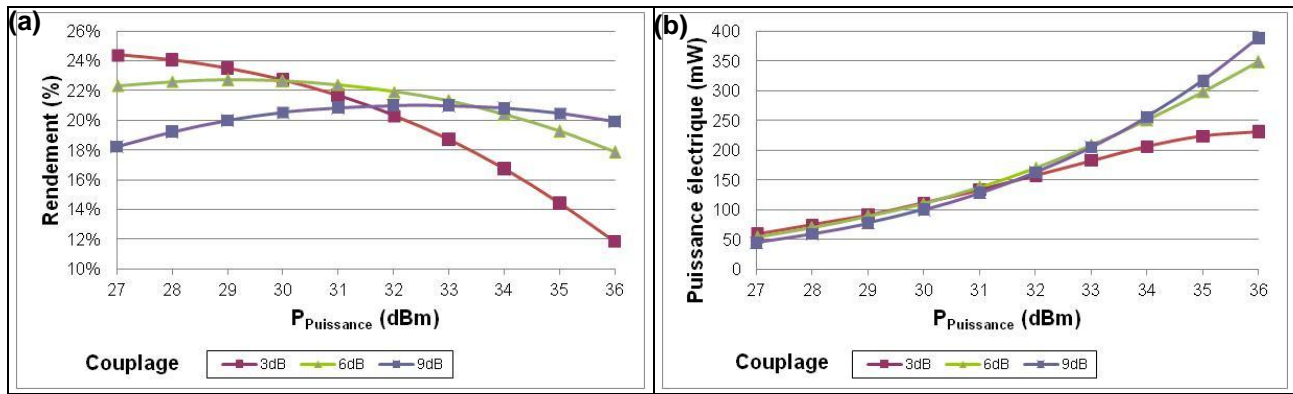


Figure 2.35 : Simulation (a) du rendement de conversion et (b) de la puissance électrique délivrée par le module de conversion O/E en fonction de la puissance optique émise par le laser et du couplage d'entrée.

Le coefficient de couplage de 3 dB n'est pas suffisant car le rendement de conversion est inférieur à 20% dès que la SLHP atteint une puissance de 32 dBm. Dans ce cas, le fonctionnement des deux cellules photovoltaïques n'est pas optimal à cause de l'importante puissance optique incidente sur chaque cellule. Sur la plage de puissance comprise entre 30 dBm et 34 dBm, nous observons que le couplage de 6 dB est le plus intéressant car le rendement est le plus grand. Au-delà de cette puissance, le coefficient de couplage de 9 dB est légèrement meilleur que celui de 6 dB.

Le couplage de 6 dB est celui qui présente le meilleur rendement dans la gamme de puissance qui nous intéresse (entre 30 dBm et 36 dBm). Le couplage à 9 dB pourrait également convenir en terme de rendement, mais il demanderait l'utilisation de davantage de cellules photovoltaïques. C'est pourquoi nous avons retenu la solution d'un coupleur à quatre sorties, associé à quatre cellules photovoltaïques.

## ii. Caractérisation du coupleur à quatre sorties

La Figure 2.36 et le Tableau 2.3 présentent les principales caractéristiques du coupleur large bande 6 dB de chez ComCore, que nous avons choisi.



Figure 2.36 : Schéma de fonctionnement du coupleur un vers quatre.

Bande passante		1310~1590 nm	
@ 1480 nm	Couplage	Port 1→2	6,04 dB
		Port 1→3	6,71 dB
		Port 1→4	6,84 dB
		Port 1→5	5,94 dB

Tableau 2.3 : Principales caractéristiques du coupleur un vers quatre.

Ce coupleur possède une large bande passante qui ne gênera pas la transmission de l'énergie, qu'elle soit située à la longueur d'onde de 1480 nm ou 1583 nm.

### iii. Caractérisation des cellules photovoltaïques

À chacune des quatre sorties du coupleur est associée une cellule photovoltaïque PPC-9LW. La Figure 2.37 présente le rendement de conversion O/E et la puissance électrique collectée par chaque cellule en fonction de la puissance optique incidente. Cette dernière est respectivement fixée à 17, 19, 20, 23 et 24 dBm. Il s'agit des valeurs qui seront atteintes à chaque sortie du coupleur 6 dB, lorsque la puissance du laser de puissance est comprise entre 30 et 36 dBm. La charge résistive associée à chaque cellule photovoltaïque est optimisée dans chaque cas. Nous tenons à préciser que les caractérisations présentées précédemment étaient réalisées avec la cellule photovoltaïque numérotée par 2 dans la figure ci-après.

Nous constatons une légère disparité dans les caractéristiques des cellules photovoltaïques, mais cette disparité reste tolérable. La cellule photovoltaïque 2 présente de meilleures performances que les trois autres, son rendement pouvant atteindre 26%, tandis que les autres ont un rendement d'environ 23%. Néanmoins, leurs performances sont correctes pour constituer le module de conversion O/E, car elles pourront fournir plus de 45 mW chacune pour une puissance optique incidente de 24 dBm. Les quatre cellules photovoltaïques sont donc satisfaisantes pour convertir la puissance incidente dans la gamme de puissance qui conviendra donc aux exigences de notre application.

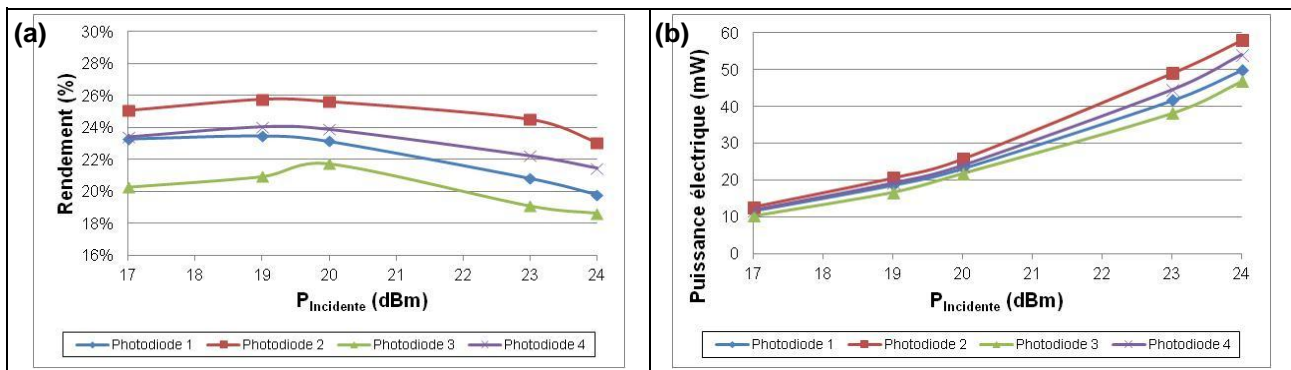


Figure 2.37 : Caractérisation des quatre cellules photovoltaïques : (a) le rendement de conversion et (b) la puissance électrique en fonction de la puissance optique incidente à la longueur d'onde de 1480 nm.

Nous avons donc caractérisé indépendamment chaque composant du dispositif expérimental. Nous connaissons le comportement de la SLHP. L'étude de la conversion O/E a mis en évidence les limites des cellules photovoltaïques. Nous avons choisi de fractionner la puissance à l'aide d'un coupleur à plusieurs voies, puis de diriger chaque voie vers une cellule photovoltaïque. D'après notre étude, un couplage de 6 dB (4 voies) est satisfaisant dans le cadre de notre application. Nous devons donc modifier le dispositif (présenté à la Figure 2.14) au niveau du terminal pour accueillir ce coupleur. La Figure 2.38 présente le dispositif modifié au niveau du terminal. Le Mux/Démux est situé à présent après le coupleur.

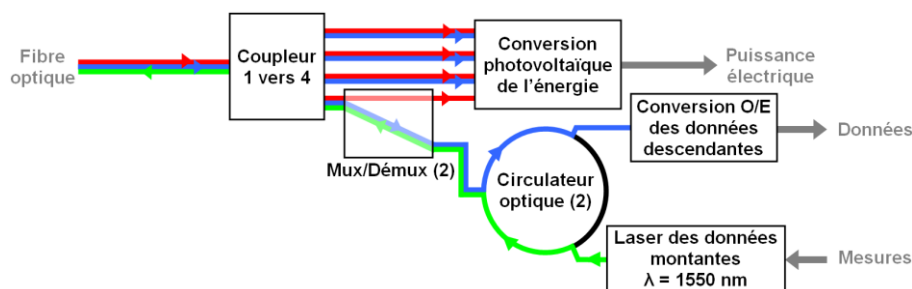


Figure 2.38 : Dispositif expérimental modifié au niveau du terminal.

## Conclusion du chapitre 2

Dans ce chapitre, nous avons présenté la mise en place du dispositif expérimental qui permettra de tester la faisabilité de l'extension tout-optique. En nous appuyant sur les travaux de la puissance sur fibre, nous avons choisi d'employer une fibre optique monomode de type SMF-28, longue de 10 km, et adaptée à la majorité des composants opto-électroniques couramment utilisés en télécommunications optiques. Nous avons choisi d'utiliser une source laser à fibre à amplification Raman comme SLHP. Elle est capable d'émettre 10 W (40 dBm) à 1480 nm. Les données, descendantes et montantes, sont émises à 1550 nm, car il s'agit du minimum d'atténuation de la fibre optique. Une puissance en sortie de la SLHP de l'ordre de 36 dBm doit permettre d'obtenir quelques centaines de milliwatts électriques au niveau du terminal. La recherche de composants optiques supportant les puissances requises fait partie des difficultés rencontrées. En effet, ceux fonctionnant dans la gamme des longueurs d'ondes souhaitées sont dédiés aux télécommunications optiques et ne sont pas prévus pour des fortes puissances. De plus, nous avons souligné un phénomène particulièrement destructeur qui peut être engendré à cause de la forte puissance : la fusion de fibre. Pour limiter ce phénomène, nous avons choisi de remplacer les connecteurs optiques par des épissures.

Dans la suite de ce chapitre, nous avons listé et expliqué les principaux phénomènes susceptibles de perturber la propagation de la puissance et des données dans notre dispositif. Tout d'abord, la diffusion Rayleigh représente 90% de l'atténuation dans une fibre optique, dans la fenêtre de transmission des télécommunications optiques. Ensuite, nous avons discuté des phénomènes non-linéaires. Parmi ceux-ci, l'effet Kerr, l'auto-modulation de phase, la modulation de phase croisée et le mélange à quatre ondes n'ont à priori pas d'incidence notable sur la propagation des ondes. La diffusion Brillouin n'aura pas non plus d'incidence sur les données et la puissance. Pour cette dernière, ceci vient du fait que la largeur spectrale de la SLHP est telle qu'elle repousse le seuil d'apparition de la diffusion Brillouin à des valeurs de puissance nettement supérieures. Enfin, nous avons étudié la diffusion Raman. Ce phénomène est présent dans le cas de la diffusion spontanée : la SLHP crée un décalage Stokes autour de 1583 nm. La diffusion Raman stimulée aura également un impact car ce phénomène nous permettra d'amplifier les données lors de leurs propagations. En étudiant plus en détail l'effet Raman, nous avons souligné que l'onde engendrée par diffusion spontanée, sera ensuite elle-même amplifiée par diffusion stimulée et générera de l'ASE. Cette dernière sera donc l'objet de toute notre attention lors des futures caractérisations de par sa grande contribution au bruit.

Enfin, nous avons présenté les caractéristiques de chaque élément du dispositif expérimental : les sources, les composants et la conversion O/E. Nous avons observé que la SLHP génère un décalage Stokes à partir de 38 dBm. Les lasers de données sont des lasers DFB émettant 10 mW au maximum, autour de 1550 nm. Ces sources de données sont utilisées uniquement pour la validation expérimentale en laboratoire et seront remplacées par d'autres sources dans le démonstrateur final. Les composants sélectionnés, c'est-à-dire les Mux/Démux et les circulateurs, supportent la puissance et sont adaptés aux longueurs d'ondes choisies. D'après la caractérisation des composants, la somme de l'atténuation et des pertes (de la source jusqu'aux cellules photovoltaïques, les pertes du coupleur à quatre voies n'étant pas comprises) est égale à 3,4 dB pour la puissance, 4,1 dB pour les données descendantes et 4,7 dB pour les données montantes. La différence de pertes entre les données descendantes et montantes est due aux différences de pertes entre les voies des circulateurs. Il faut noter également que l'onde de puissance ne passe pas par les circulateurs. À cela, il faut ajouter les pertes du coupleur à quatre voies (environ 6 dB). La conversion O/E de la puissance a

cependant posé problème car la cellule photovoltaïque atteint sa limite de bon fonctionnement à cause de la forte puissance incidente. Il est également nécessaire d'ajuster la résistance de charge associée à la cellule photovoltaïque pour optimiser le rendement de conversion O/E. Pour résoudre le problème de limitation en puissance, nous avons fractionné la puissance en quatre parties que nous dirigeons vers quatre cellules photovoltaïques associées électriquement. Nous espérons ainsi obtenir un rendement de conversion supérieur à 20%.

Le dispositif expérimental étant maintenant décrit, nous présentons dans le chapitre suivant la caractérisation en régime statique, en fonction de la puissance émise par chaque source. Nous précisons aussi le rendement de conversion obtenu par notre module O/E. Afin de bien comprendre la diffusion Raman pour notre application, nous étudierons en détail son impact sur la puissance et les données émises en régime statique.

# Chapitre 3 : Caractérisation en régime statique

## Sommaire

Introduction du chapitre 3 .....	82
3.1. Dispositif expérimental : description du banc .....	84
3.2. Caractérisation du transport de la puissance .....	88
3.2.1. Transport de la puissance .....	88
3.2.2. Caractérisation du module de conversion O/E.....	91
3.3. Caractérisations de l'amplification Raman .....	93
3.3.1. Superposition de la puissance et des données descendantes.....	93
3.3.2. Optimisation de l'amplification Raman pour notre dispositif .....	95
3.4. Caractérisations : superposition de la puissance et des données.....	101
3.4.1. Superposition de la puissance et des données descendantes.....	101
3.4.2. Superposition de la puissance et des données montantes .....	104
3.4.3. Superposition de la puissance et des données descendantes et montantes	106
3.5. Modélisation des phénomènes optiques dans notre dispositif .....	111
3.5.1. La diffusion Raman.....	111
3.5.2. La diffusion Brillouin .....	117
3.5.3. La double rétrodiffusion Rayleigh .....	119
3.5.4. Équations d'évolutions.....	121
3.6. Mise en application du modèle.....	124
3.6.1. Comparaison des résultats de modélisation aux résultats expérimentaux	124
3.6.2. Évolution des phénomènes optiques .....	126
Conclusion du chapitre 3.....	129

## Introduction du chapitre 3

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit le dispositif expérimental mis en place pour étudier la faisabilité de la transmission de la puissance et des données sur une seule fibre longue de 10 km. Les caractéristiques de notre dispositif ont été choisies en s'inspirant de l'état de l'art de la puissance sur fibre tel que présenté dans le chapitre 1. Nous avons noté que les SLHP (Source Laser de Haute Puissance) couramment employées sur les dispositifs longs de 10 km permettent de recueillir uniquement quelques milliwatts électriques. Or, notre cahier des charges impose de fournir quelques centaines de milliwatts électriques au terminal. Nous avons ainsi calculé que notre SLHP doit émettre environ 5 W pour répondre à cette demande.

La propagation de la forte puissance optique sur une longue distance n'est pas usuelle dans les systèmes à fibre optique. En conséquence, peu de composants optiques et opto-électroniques y sont adaptés. La fibre optique monomode (SMF) elle-même, de par son faible diamètre de cœur, est sensible à la forte puissance propagée, et nous avons montré que la « fusion de fibre » peut gravement endommager la fibre optique sur quelques kilomètres à cause de la concentration de la puissance (§ 2.1.2). Pour atténuer ce risque, nous avons montré qu'il est préférable de remplacer les connecteurs optiques classiques par des épissures.

Par ailleurs, des phénomènes optiques vont agir sur la propagation des ondes de la puissance et des données. Parmi les plus influents, nous retrouvons la diffusion Raman stimulée qui amplifie le niveau de puissance des données, la diffusion Raman spontanée amplifiée de l'onde à 1583 nm et la diffusion Rayleigh. Nous nous intéressons également à la diffusion Brillouin. Dans la suite de ce chapitre, nous proposons de mettre en évidence expérimentalement l'impact de ces phénomènes sur la propagation de la puissance et des données.

Dans ce chapitre, nous caractérisons le dispositif expérimental en régime statique, c'est-à-dire sans moduler les ondes portant les données descendantes et montantes. Nous étudions le comportement des différentes ondes lors de leur propagation, pour différents niveaux de puissances injectées. Nous pouvons ainsi évaluer l'influence des phénomènes physiques qui apparaissent, et chercher à en tirer profit si possible, ou le cas échéant à les atténuer.

Dans un premier temps (section 3.1), nous présentons le dispositif expérimental de mesure, ainsi que les méthodes que nous avons employées pour réaliser l'ensemble des caractérisations.

Dans un second temps (section 3.2), nous exposons les résultats expérimentaux dans le cas du transport de la puissance uniquement. Nous observons ainsi l'évolution de la propagation de la forte puissance dans une fibre optique monomode. Lors de cette caractérisation, nous présentons les tests du module de conversion O/E (Optique/Électrique), qui a été introduit dans le précédent chapitre.

Ensuite, (section 3.3), nous nous concentrons sur la diffusion Raman. Nous observons tout d'abord son effet sur les données émises à 1550 nm qui permet, nous le verrons, de les amplifier. À partir de ces résultats, nous cherchons à optimiser cette amplification en modifiant la longueur d'onde des données. Nous argumentons ainsi sur le choix à faire pour la longueur d'onde portant les données dans notre dispositif.

Après avoir validé notre choix en longueur d'onde, nous étudions la superposition de la puissance et des données descendantes et/ou montantes dans la fibre optique (section 3.4). Nous relevons les spectres optiques en différents emplacements du montage et nous comparons les niveaux de puissances obtenus aux longueurs d'ondes portant respectivement la puissance et les données. Ces relevés nous fournissent ainsi des informations pour suivre

l'évolution de la propagation des données dans le dispositif. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'amplification des données par diffusion Raman.

Enfin (section 3.5), afin de mieux comprendre les phénomènes observés lors de la caractérisation expérimentale, nous mettons en place un modèle théorique de la propagation des ondes optiques à partir de la bibliographie à notre disposition. Le principal phénomène étudié est la diffusion Raman stimulée.

Afin de valider ce modèle, nous comparons ces résultats aux résultats expérimentaux (section 3.6). Nous pouvons ainsi évaluer la contribution de chaque phénomène sur les ondes optiques se propageant dans la fibre.

Un « marque-page » est à découper à la fin du manuscrit. Ce document réuni le informations importantes pour faciliter la lecture de ce chapitre.





Nous définissons dans la suite le sens des données par les termes : descendant et montant. Les données descendantes se dirigent de l'interface BJ vers le terminal, tandis que les données montantes accomplissent le chemin inverse.

Les deux coupleurs 95/5 insérés de part et d'autre de la fibre permettent de mesurer la puissance et de relever le spectre des signaux incidents et rétrodiffusés aux deux extrémités de la fibre optique. Dans le système final, ces deux coupleurs n'apparaîtront bien évidemment plus. Il s'agit de coupleurs ultra-larges bandes provenant de la société ComCore. Leurs principales caractéristiques sont exposées dans le Tableau 3.1. La numérotation des ports correspond à celle de la Figure 3.2. On note un léger écart entre les pertes d'insertion et le couplage des deux coupleurs.

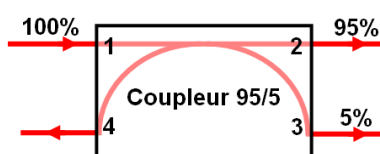


Figure 3.2 : Schéma de fonctionnement du coupleur 95/5.

			Coupleur 95/5 (1)	Coupleur 95/5 (2)
Bande passante		1450~1605 nm		
@ 1480 nm	Pertes d'insertion	Port 1 → 2	0,4 dB	0,6 dB
	Couplage	Port 1 → 3	14,0 dB	13,1 dB
		Port 2 → 4	13,7 dB	12,8 dB
@ 1550 nm	Pertes d'insertion	Port 1 → 2	0,3 dB	0,2 dB
	Couplage	Port 1 → 3	13,4 dB	12,5 dB
		Port 2 → 4	13,3 dB	12,6 dB
Puissance maximale		5 W (37 dBm)		

Tableau 3.1 : Principales caractéristiques des coupleurs 95/5.

Les connexions entre chaque composant, devant supporter une grande puissance et être extrêmement propres (§ 2.1.2), sont donc réalisées par des épissures.

Caractériser finement le dispositif expérimental nécessite de déterminer les puissances en de nombreux points, représentés par  $A_P$ ,  $A_D$ ,  $A_M$ ,  $B$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $B_4$ ,  $B_D$ ,  $B_M$ ,  $C_{1D}$ ,  $C_{1M}$ ,  $C_{2D}$ ,  $C_{2M}$ ,  $F_D$  et  $F_M$ . L'ensemble de ces points est accessible directement à la mesure sauf  $A_P$ ,  $B$ ,  $F_D$  et  $F_M$ . En effet, nous ne disposons pas de moyen matériel capable de mesurer directement la forte puissance en sortie du laser ( $A_P$ ). Cette mesure peut par contre se faire indirectement grâce à un coupleur intégré dans la SLHP, qui prélève une partie de la puissance, vers une sortie appelée Tap. Cette sortie Tap est une image de la sortie de la SLHP, atténuée de 21 dB.

Le point de mesure  $B$  était un point accessible au tout début de la thèse, avant la connexion du coupleur à quatre voies. Après avoir complété le dispositif, la puissance en  $B$  est accessible via le point de mesure  $C_{2D}$  en prenant en compte le coefficient de couplage du coupleur 95/5 (2).

La connaissance de la puissance aux emplacements  $F_D$  et  $F_M$  nous renseigne sur l'évolution de la propagation de la puissance dans la fibre. Nous mesurons indirectement la puissance en ces points via, respectivement, les points de mesure  $C_{1D}$  et  $C_{2D}$  dans le cas d'ondes descendantes, et via les points  $C_{2M}$  et  $C_{1M}$  dans le cas d'ondes montantes.

Les points  $C_{1D}$  et  $C_{2D}$  permettent de déterminer la puissance transmise dans le sens descendant, respectivement avant et après propagation dans la fibre, en tenant compte des caractéristiques des coupleurs 95/5. Le point  $C_{2D}$  permet aussi de mesurer la puissance réfléchie lors de la propagation dans la fibre pour les ondes montantes.

De même, les points  $C_{2M}$  et  $C_{1M}$  permettent de mesurer la puissance transmise dans le sens montant, respectivement avant et après propagation dans la fibre, en tenant compte des caractéristiques des coupleurs 95/5. Le point  $C_{1M}$  permet aussi de relever la puissance rétrodiffusée dans le cas d'ondes descendantes.

Nous pouvons ainsi observer l'évolution des différents signaux au sein du dispositif. L'ensemble des caractérisations est effectué avec un radiomètre Anritsu (MT 9810B) associé à une sonde (MA 9331A), et avec un analyseur de spectre optique (MS 9710B).

La sonde MA 9331A du radiomètre permet de mesurer des puissances comprises entre -50 dBm et 35 dBm, dans la bande spectrale optique comprise entre 940 nm et 1640 nm. Le radiomètre nous renseignant uniquement sur la puissance totale, nous emploierons l'analyseur de spectre optique pour distinguer les puissances respectives des lasers de données et de la SLHP.

Pour couvrir à la fois les plages spectrales de la SLHP (autour de 1480 nm) des lasers de données (autour de 1550 nm), ainsi que celle de l'ASE (autour de la longueur d'onde Stokes de 1583 nm), nous avons choisi de relever des spectres sur une bande comprise entre 1250 nm et 1750 nm, avec une résolution de 0,1 nm et un échantillonnage de 5001 points. Selon la puissance reçue, nous sommes amenés à modifier la valeur du minimum de puissance reçue pour gagner en précision. La valeur par défaut est fixée à -70 dBm, valeur que nous diminuons à -80 dBm si nécessaire. Ce changement présente l'inconvénient de multiplier la durée de mesure par dix. De plus, afin d'affiner nos mesures, nous avons choisi de faire l'acquisition de dix spectres, puis de conserver le spectre issu du moyennage. Selon ces choix, l'acquisition d'un spectre moyenné dure 1 min ou 10 min.

Sur la Figure 3.1, les deux lasers de données sont notés comme émettant à 1550 nm. En fait, nous rappelons que nous utilisons principalement un laser DFB émettant à 1549,5 nm. Cependant, nous noterons toujours dans la suite, par simplicité, que ce laser émet à 1550 nm. Par contre, dans le cas de la superposition des données descendantes et montantes, le laser de données montantes est une source accordable décrite dans le chapitre 2, avec une émission fixée à 1551 nm. Cette longueur d'onde correspond à celle du laser faiblement consommant prévu pour une première version du prototype. Nous avons choisi un écart d'environ 1 nm entre les longueurs d'ondes montantes et descendantes de telle sorte à pouvoir les distinguer facilement lors des mesures spectrales. Dans ce chapitre, nous noterons que la puissance est relevée à 1551 nm pour cette source.

Dans ce chapitre, nous présenterons à plusieurs reprises les spectres optiques relevés aux différents points de mesure. Sur chaque spectre, il sera mentionné la puissance émise par le ou les lasers (en  $A_P$ ,  $A_D$  et  $A_M$ ), la puissance totale mesurée sur l'ensemble de la fenêtre spectrale (1450-1750 nm), la puissance mesurée à  $1480 \pm 10$  nm, la puissance mesurée à  $1550 \pm 0,5$  nm, la puissance mesurée à  $1551 \pm 0,5$  nm et la puissance mesurée à  $1583 \pm 20$  nm.

Les conditions de mesure étant maintenant définies, dans la suite, nous caractérisons notre dispositif en procédant par étapes. Tout d'abord, nous transmettons uniquement la puissance. Cela permet d'observer le comportement de la forte puissance se propageant dans la fibre. Nous caractérisons également le module de conversion O/E pour valider son fonctionnement.

L'étape suivante consiste à superposer l'énergie et les données. Nous distinguons trois configurations de superposition de la puissance et des données :

- énergie et données descendantes ;
- énergie et données montantes ;
- énergie et données descendantes et montantes.

Dans chaque configuration, nous observerons le comportement du niveau de puissance des données en fonction de la puissance de la SLHP.

## 3.2. Caractérisation du transport de la puissance

Dans cette partie, nous étudions le dispositif en transmettant uniquement la puissance pour observer le comportement de l'onde optique au cours de sa propagation. Nous en profitons également pour caractériser expérimentalement le module de conversion O/E.

### 3.2.1. Transport de la puissance

Les mesures sont effectuées en plaçant successivement l'analyseur de spectre en chaque point de mesure, pour une puissance fixée de la SLHP. Nous nous sommes limités à une puissance maximale de 36 dBm pour éviter d'endommager les composants. Quelques exemples de spectres obtenus aux points  $A_P$  (via la sortie Tap), B et  $C_{1M}$  pour les puissances respectives de 30 dBm, 33 dBm, 36 dBm sont représentés à la Figure 3.3.

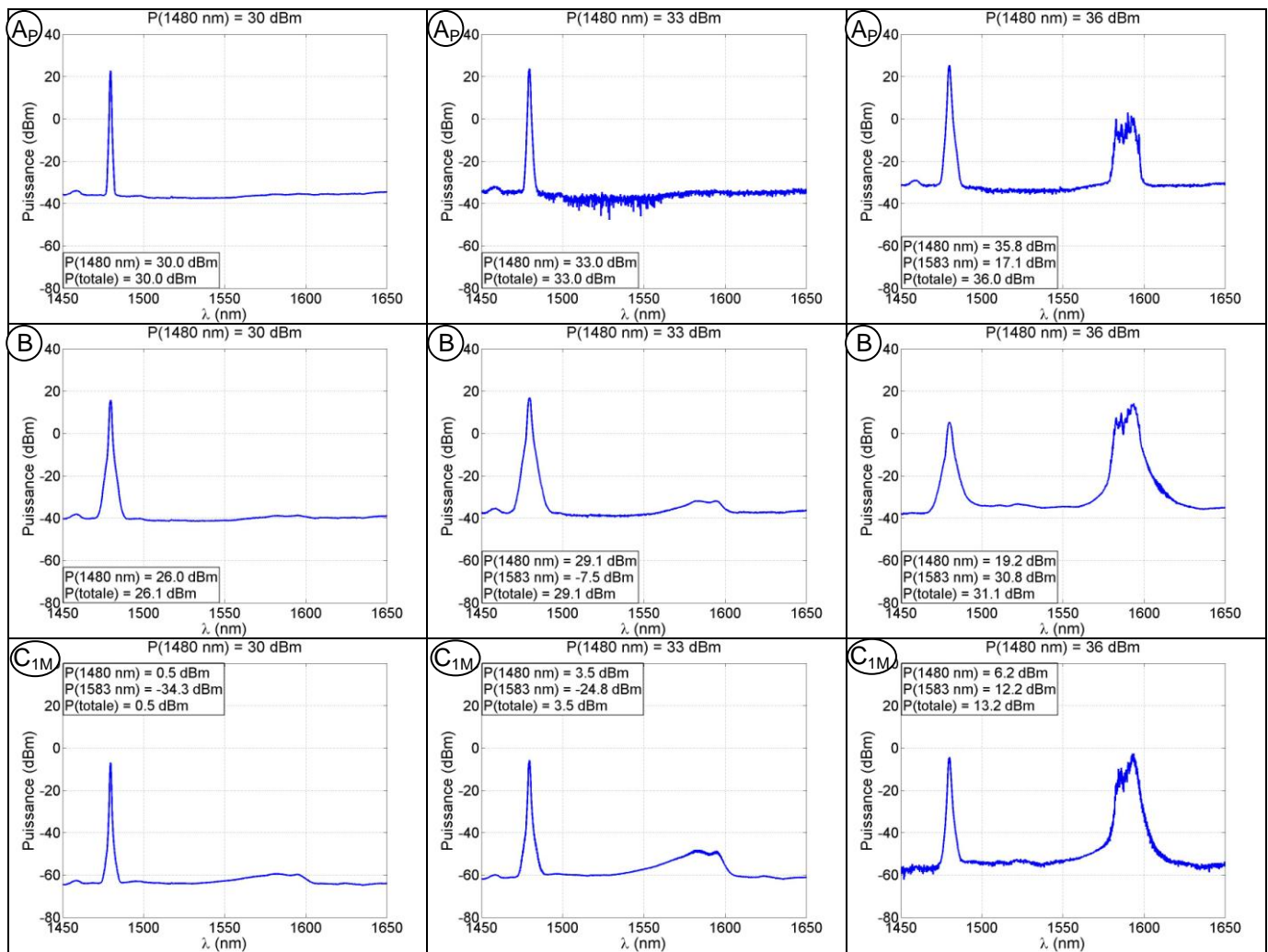


Figure 3.3 : Spectres relevés en différents points (points  $A_P$ , B et  $C_{1M}$ ) pour une puissance laser réglée à 30 dBm, 33 dBm et 36 dBm.

Tout d'abord, si nous comparons la puissance relevée aux points  $A_P$  et B lorsque la SLHP émet 30 dBm et 33 dBm, nous obtenons 4 dB de pertes dans la chaîne. Le résultat obtenu est donc cohérent avec les caractérisations effectuées dans le chapitre 2, qui prévoyait 4,1 dB de pertes entre les points  $A_P$  et B.

Nous notons, en sortie de la fibre (en B), l'apparition de la puissance autour de 1583 nm : il s'agit de l'ASE (Amplified Spontaneous Emission), engendrée par le décalage Stokes de l'onde de puissance à 1480 nm. Cet effet est relativement faible lorsque la SLHP émet à 30 dBm et plus marqué à 33 dBm. Mais, pour une puissance de 36 dBm, il devient si prépondérant que la puissance mesurée autour de 1583 nm est plus importante qu'à 1480 nm.

Nous pouvons réaliser les mêmes remarques dans le cas de la rétrodiffusion. En effet, les spectres relevés en  $C_{1M}$  montrent bien que de la puissance apparaît autour de 1583 nm. De plus, nous remarquons que la puissance totale rétrodiffusée atteint 13,2 dBm en  $C_{1M}$ , soit 26,5 dBm en tenant compte des pertes du coupleur, lorsque la puissance de la SLHP est égale à 36 dBm. Cela signifie qu'une puissance de près de 27 dBm est rétrodiffusée vers la source.

Par ailleurs, ce décalage Stokes apparaît également en sortie de la SLHP (en  $A_P$ ) lorsque la puissance de la SLHP est de 36 dBm. Or ce décalage n'existait pas dans le cas où la source n'était pas connectée au dispositif (Figure 2.16). Nous supposons que ce phénomène est dû à la rétrodiffusion importante de la puissance de la fibre vers la SLHP. Cette puissance rétrodiffusée perturbe la SLHP et y est réfléchi en partie. Cela a pour conséquence de générer de l'ASE autour de 1583 nm.

Nous observons aussi un élargissement de la raie à 1480 nm en B et en  $C_{1M}$ , à mesure que la puissance de la SLHP augmente. Nous avons ainsi relevé, lorsque la puissance de la SLHP est égale à 36 dBm, que la largeur de bande à mi-hauteur au point  $A_P$  est de 1,1 nm, tandis que celle au point B est de 2,3 nm. Nous avons déjà noté cet élargissement en sortie de la SLHP (Chapitre 2). Mais la propagation dans la fibre renforce encore cet élargissement.

Enfin, nous remarquons que le plancher de puissance minimum augmente lorsque la puissance de la SLHP croît. Bien que cette puissance supplémentaire soit négligeable, elle pourrait être une source de bruit pour les données à 1550 nm. Cette augmentation est accentuée autour de 1550 nm par la contribution du décalage Stokes centré sur 1583 nm. Nous devons donc tenir compte de ces aspects lors de l'étude de la transmission des données.

Pour compléter les informations apportées par les exemples de la Figure 3.3, nous présentons sur les Figure 3.4, Figure 3.5 et Figure 3.6 l'évolution de la puissance totale, de la puissance à 1480 nm et à 1583 nm mesurées en sortie de la SLHP (en  $A_P$ ), en sortie de la fibre optique (en B), et rétrodiffusées en entrée de la fibre (en  $F_M$ , avec une mesure en  $C_{1M}$  corrigée en tenant compte du coefficient de couplage du coupleur 95/5 (1)).

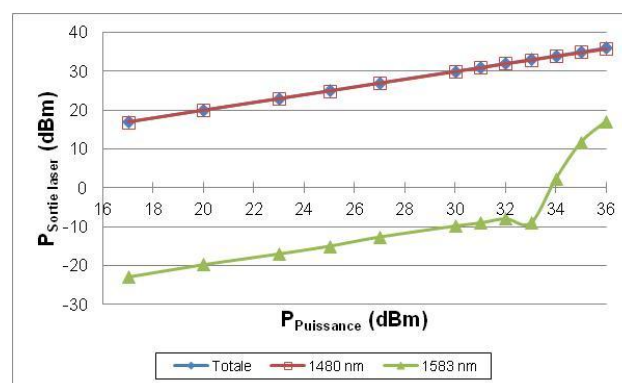


Figure 3.4 : Évolution de la puissance optique en sortie de la SLHP (en  $A_P$ ) en fonction de la puissance délivrée par la SLHP, et en particulier à 1480 nm et autour de 1583 nm.

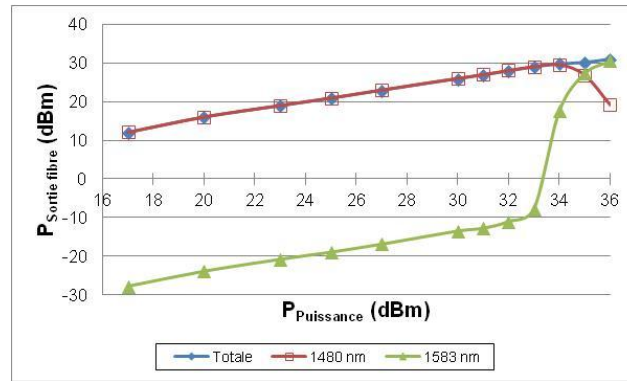


Figure 3.5 : Évolution de la puissance optique en sortie de la fibre optique (en B) en fonction de la puissance délivrée par la SLHP, et en particulier à 1480 nm et autour de 1583 nm.

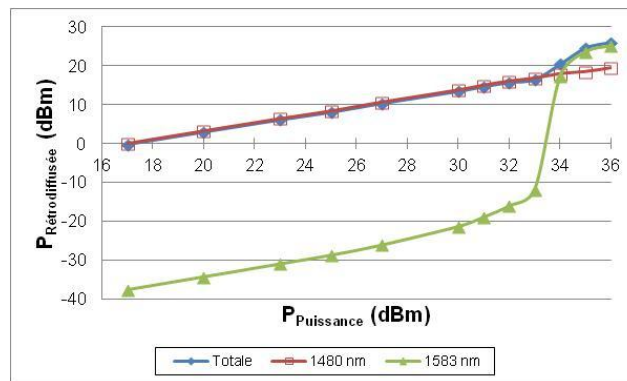


Figure 3.6 : Évolution de la puissance optique rétrodiffusée par la fibre optique (en  $F_M$ , avec une mesure en  $C_{IM}$ , corrigée par le coefficient de couplage du coupleur) en fonction de la puissance délivrée par la SLHP, et en particulier à 1480 nm et autour de 1583 nm.

Dans chaque cas, et pour chaque longueur d'onde, la puissance augmente de façon « linéaire » en dBm lorsque la puissance du laser est comprise entre 17 dBm et 33 dBm. Au-delà, nous observons une brusque augmentation de la puissance autour de 1583 nm.

Cette augmentation de la puissance, générée par la diffusion Raman, est également présente en sortie de la SLHP. Or, rappelons le, ce phénomène n'était pas présent dans le cas de la SLHP seule (Figure 2.17).

Nous observons ensuite en sortie de la fibre une décroissance de la puissance autour de 1480 nm et une croissance de la puissance autour de 1583 nm. Par ailleurs, la puissance totale en sortie de la fibre augmente moins rapidement entre 34 et 36 dBm. En effet, l'onde générée autour de 1583 nm est amplifiée lors de la propagation avec la puissance à 1480 nm. La puissance autour de 1583 nm n'étant plus négligeable, la « réserve d'énergie » disponible autour de 1480 nm se réduit pour contribuer à l'amplification de l'ASE. De plus, une partie de cette « réserve d'énergie » amplifie également la puissance du signal rétrodiffusée. Cette puissance rétrodiffusée devenant non négligeable à partir de 33 dBm émis par la SLHP, ce transfert contribue aussi à diminuer la puissance à 1480 nm, mesurée en sortie de la fibre.

C'est pourquoi nous observons que la puissance rétrodiffusée autour de 1583 nm dépasse celle rétrodiffusée à 1480 nm, et augmente d'ailleurs la puissance totale rétrodiffusée. L'onde rétrodiffusée contenant aussi de la puissance à 1583 nm est amplifiée par le même phénomène.

Nous rappelons que notre but est de transmettre le maximum de puissance au niveau du terminal. Le décalage en puissance autour de 1583 nm peut être problématique quant aux

performances des composants utilisés dans le dispositif. En ce qui concerne le Mux/Démux (1), la puissance incidente venant de la SLHP reste majoritairement centrée sur 1480 nm, et par conséquent nous pouvons estimer que ce composant ne présentera pas de pertes significatives vis-à-vis de la puissance. En sortie de la fibre optique, l'onde optique de puissance rencontre tout d'abord le coupleur (2), puis le coupleur à quatre sorties. Ces coupleurs sont larges bandes et laissent donc passer la puissance à 1583 nm. Concernant le coupleur à quatre sorties, trois voies sont dirigées directement vers les cellules photovoltaïques. La quatrième voie contient le Mux/Démux (2), avant d'être dirigée vers la dernière cellule photovoltaïque. Les cellules de conversion O/E sont également large bande. La puissance à 1583 nm sera donc convertie avec le même rendement que la puissance à 1480 nm. Seule la puissance décalée à 1583 nm et dirigée dans quatrième voie sera perdue de moitié, à cause du passage dans le Mux/Démux (2) (§ 2.2.3.c). Donc, le décalage en puissance ne devrait pas réduire de façon significative l'énergie électrique recueillie au niveau du terminal. Nous vérifions cela en caractérisant le module de conversion O/E dans la suite.

### 3.2.2. Caractérisation du module de conversion O/E

Le module de conversion O/E est constitué de quatre cellules photovoltaïques de puissance, qui peuvent se connecter électriquement de différentes manières : en série, en parallèle ou en association hybride série et parallèle (Figure 3.7). Nous avons testé ces trois configurations afin de choisir la configuration la plus adéquate pour répondre aux besoins électriques au niveau du terminal.

La Figure 3.8 présente l'évolution du rendement de conversion O/E et de la puissance électrique délivrée par le module de conversion O/E en fonction de la puissance du laser de puissance. Le rendement correspond au rapport entre la puissance électrique fournie par le module de conversion O/E et la puissance optique relevée en sortie de la fibre optique (en B). Chaque courbe représentée correspond aux trois associations de cellules photovoltaïques. Pour cela, la résistance de charge  $R$  est optimisée afin d'obtenir un rendement maximum.

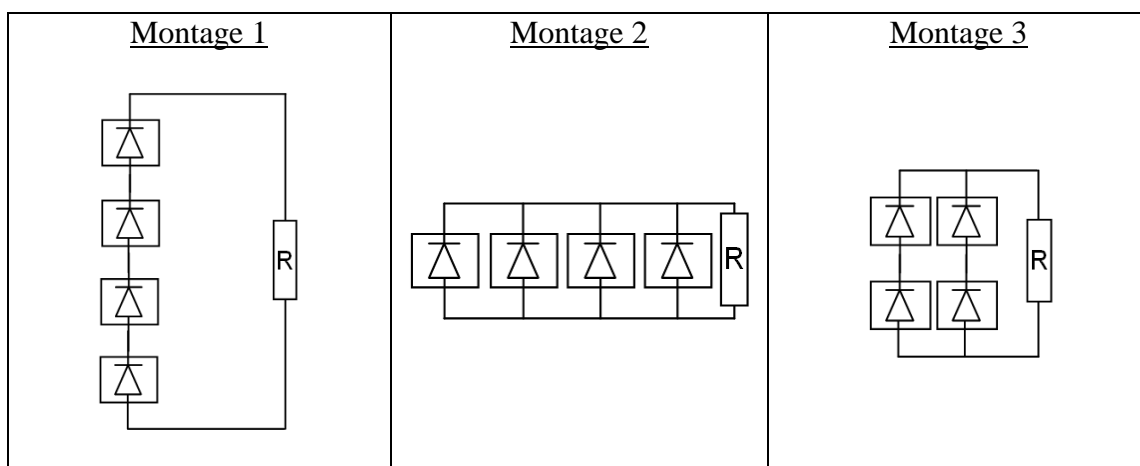


Figure 3.7 : Schéma des trois montages d'association des cellules photovoltaïques.



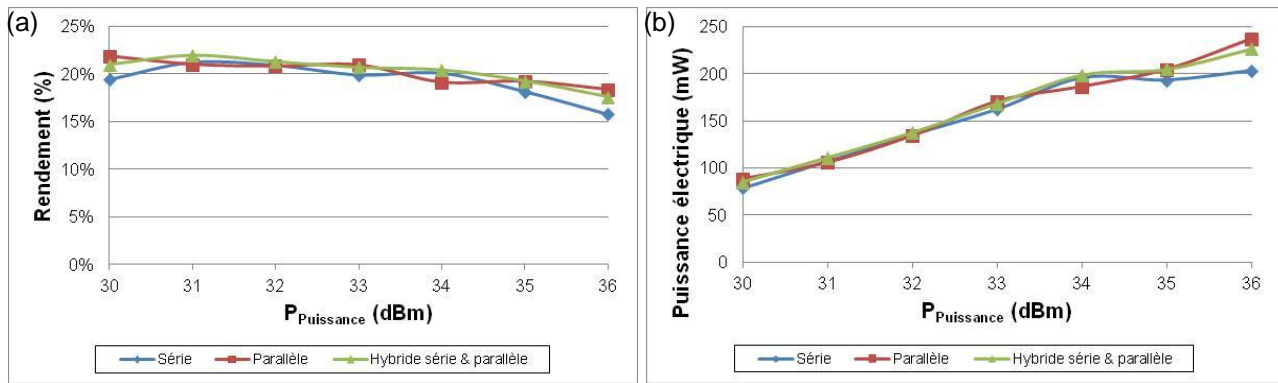


Figure 3.8 : Mesures (a) du rendement de conversion et (b) de la puissance électrique délivrée par le module de conversion O/E en fonction de la puissance émise par la SLHP pour les trois montages d'association des photodiodes étudiées.

Nous observons que le rendement de conversion diminue tandis que la puissance émise par la SLHP augmente. Néanmoins, lorsque la puissance émise par la SHLP est égale à 36 dBm, le rendement reste de l'ordre de 18%. Cette valeur est en accord avec celle attendue dans le chapitre 2 (§ 2.2.4.a). Nous constatons que la puissance électrique totale recueillie atteint au maximum environ 240 mW. Nous avons donc atteint notre objectif d'obtenir quelques centaines de milliwatts disponibles pour l'alimentation de l'instrument.

Nous comparons les performances obtenues sur ces trois montages dans le Tableau 3.2 ci-après, dans le cas où la puissance de la SLHP est à sa valeur maximale (36 dBm).

Montage	Série	Parallèle	Hybride série & Parallèle
P <sub>électrique</sub> délivrée	203,3 mW	237,0 mW	226,7 mW
Rendement	15,8%	18,4%	17,6%
Tension	14,7 V	3,3 V	7,0 V
Intensité	13,8 mA	71,8 mA	32,2 mA
R <sub>opt</sub>	1,1 kΩ	46 Ω	219 Ω

Tableau 3.2 : Comparaison des trois montages d'association des cellules photovoltaïques ( $P_{SLHP} = 36$  dBm).

Les trois montages d'association des cellules photovoltaïques proposés donnent donc un bon rendement entre 15% et 20%. La différence majeure provient de la valeur de la charge résistive optimale pour obtenir le meilleur rendement. Ces résultats permettent d'orienter les choix technologiques à effectuer dans le développement de l'interface Instrument, dont la tension à appliquer à l'entrée du circuit électrique et l'impédance d'entrée.

Au cours de cette première partie, nous avons étudié le transport de la puissance sur la fibre et nous avons mis en évidence la présence de la diffusion Raman. Cette diffusion Raman crée un décalage de la puissance de 1480 nm vers 1583 nm qui n'est cependant pas trop préjudiciable à la conversion O/E de la puissance. Le module de conversion O/E permet d'obtenir une puissance comprise entre 200 mW et 240 mW selon l'architecture du module de conversion lorsque la SLHP émet 36 dBm.

Nous présentons dans la suite une étude sur la diffusion Raman car son impact sur la propagation des données superposées à la puissance est à évaluer.



### 3.3. Caractérisations de l'amplification Raman

Nous avons vu que la diffusion Raman joue un rôle important dans le transport de la puissance. Nous devons donc étudier l'impact de cette diffusion Raman sur les données transmises. Dans un premier temps, nous superposons la puissance et les données descendantes et analysons les mesures. Nous proposons ensuite d'étudier l'influence de l'amplification Raman sur les données en fonction de la puissance de la SLHP et de la longueur d'onde du laser de données.

#### 3.3.1. Superposition de la puissance et des données descendantes

Le dispositif expérimental utilisé est toujours celui présenté sur la Figure 3.1 avec cette fois le laser des données descendantes actif. Comme précédemment, nous suivons l'évolution de la puissance sur la chaîne complète. La Figure 3.9 présente les spectres relevés en sortie de la fibre optique (en B), sans et pour plusieurs puissances de la SLHP : 30 dBm, 33 dBm et 36 dBm. La puissance de la source de données est fixée à 0 dBm.

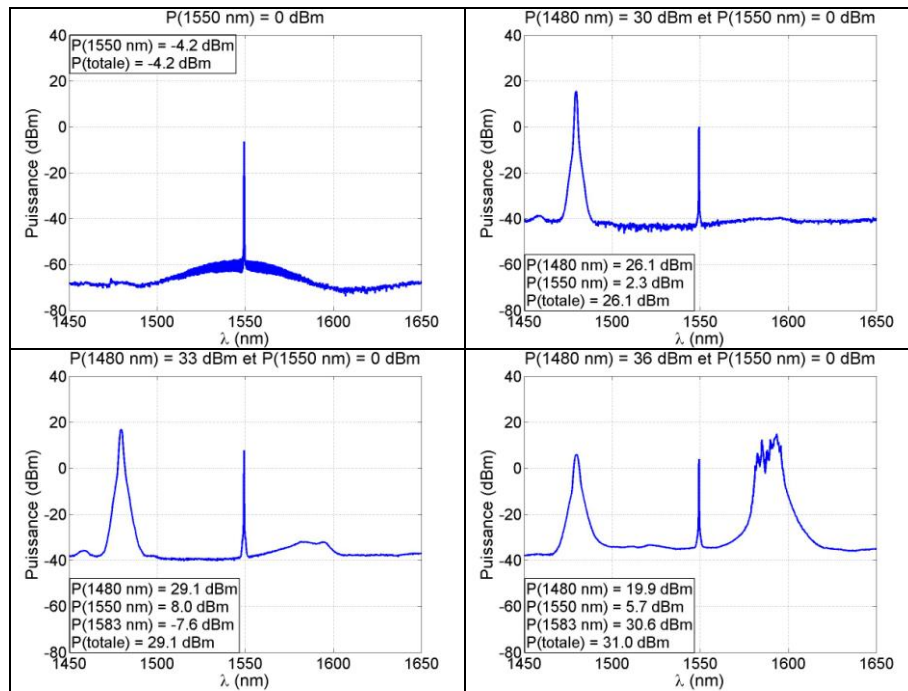


Figure 3.9 : Spectres relevés en sortie de la fibre optique (en B) sans et avec  $P_{SLHP} = 30$  dBm, 33 dBm ou 36 dBm, et  $P_{1550\text{ nm}} = 0$  dBm.

Tout d'abord, lorsque les données sont transmises seules, elles subissent des pertes de 4,2 dB entre la source laser (en  $A_D$ ) et la sortie de la fibre optique (en B). D'après la caractérisation des composants, les pertes devraient être de 3,5 dB : les pertes supplémentaires de l'ordre de 0,7 dB sont attribuées au problème posé par la connectique lors des mesures aux différents points.

Ensuite, nous constatons que les deux longueurs d'ondes coexistent parfaitement lors de leur propagation le long de la fibre, même en présence d'une puissance élevée (36 dBm). Par ailleurs, nous observons que les pertes sont compensées, voire surcompensées en présence de la puissance, par amplification Raman. Par exemple, lorsque la SLHP émet 33 dBm, les

données bénéficient d'un gain de 12,2 dB, par rapport à la puissance des données reçues en B sans l'émission de puissance de la SLHP.

Afin de compléter ces observations, nous souhaitons suivre l'évolution des puissances, et notamment celle des données en fonction de la puissance émise par la SLHP. Or, il est nécessaire de rappeler que la SLHP produit du bruit par diffusion Raman spontanée autour de 1583 nm et donc à 1550 nm. Afin de déterminer parfaitement l'amplification des données, nous devons retirer ce bruit à la puissance mesurée sur le spectre relevé (Figure 3.10).

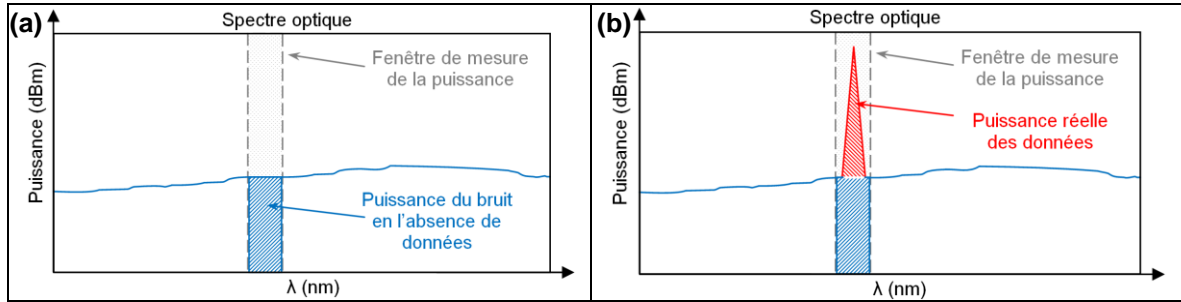


Figure 3.10 : Illustration du calcul de la puissance réelle des données d'après les spectres optiques : nous retirons la puissance mesurée en (a) en l'absence de données à la puissance totale mesurée en (b) en présence des données.

La courbe du relevé de puissance à 1550 nm est ainsi obtenue en soustrayant la puissance mesurée sans les données à la puissance mesurée avec les données :

$$P_{1550nm,B}(dBm) = 10 \cdot \log_{10} (P_{1550nm,B}^{puissance+données}(mW) - P_{1550nm,B}^{puissance}(mW)) \quad (3.1)$$

avec :

$P_{1550nm,X}^L$  la puissance relevée à  $(1550 \pm 10)$  nm au point de mesure X avec le ou les lasers L en fonction.

Nous relevons l'évolution de la puissance mesurée en sortie de la fibre, à partir des spectres optiques, à  $1480 \pm 10$  nm, sans et avec transmission de données, à  $1550 \pm 0,5$  nm (en tenant compte du calcul (3.1)) et à  $1583 \pm 20$  nm, et cela en fonction de la puissance de la SLHP (Figure 3.11).

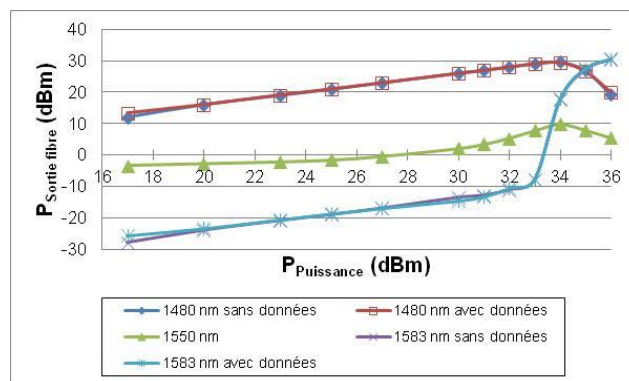


Figure 3.11 : Évolution des puissances obtenues en sortie de la fibre sur les bandes spectrales  $(1480 \pm 10)$  nm,  $(1550 \pm 0,5)$  nm et  $(1583 \pm 20)$  nm avec  $P_{1550nm} = 0$  dBm, en fonction de la puissance de la SLHP.

Comme nous pouvions nous y attendre dans nos conditions de mesures, nous observons que la puissance à 1480 nm n'est pas affectée par la présence ou non des données ; ce qui est

le cas également de la puissance à 1583 nm. Par contre, la puissance à 1550 nm augmente avec la puissance à 1480 nm par diffusion Raman stimulée.

Nous allons étudier plus en détail la diffusion Raman dans la suite de ce paragraphe, avant de continuer la caractérisation complète du système.

### **3.3.2. Optimisation de l'amplification Raman pour notre dispositif**

Nous avons décrit la diffusion Raman dans le Chapitre 2 et nous savons que le maximum d'amplification se situe à 13,2 THz de la fréquence de l'onde pompe, soit autour de 1583 nm lorsque la pompe est à 1480 nm. Nous pouvons tenter de tirer un profit maximum de cette amplification en modifiant la longueur d'onde des données. L'étude présentée dans la suite a pour but de valider le choix des longueurs d'ondes déjà réalisé pour les données.

#### **3.3.2.a. Amplification Raman en fonction de la puissance pour deux longueurs d'onde de données**

Nous testons le comportement des données dans le dispositif pour deux longueurs d'ondes légèrement différentes en fonction de la puissance de la SLHP. Nous choisissons :

- 1585 nm, qui est proche de la longueur d'onde Stokes générée par le laser de puissance (1583,1 nm) ;
- 1550 nm, longueur d'onde plus couramment utilisée en télécommunications, mais qui ne permettra pas de bénéficier de l'amplification maximale apportée par la diffusion Raman.

Dans le cas de la longueur d'onde à 1585 nm, nous remplaçons le laser de données par la source accordable Photonetics Tunic déjà employée dans le chapitre 2 (§ 2.2.2.b).

Nous comparons sur la Figure 3.12 les spectres relevés en sortie de la fibre optique (point de mesure B sur la Figure 3.1) pour les deux valeurs de longueur d'onde, 1550 nm et 1585 nm lorsque le signal des données est descendant. Cette comparaison est réalisée pour deux valeurs de la puissance de la SLHP : 33 dBm et 36 dBm. La puissance des données est fixée à 0 dBm. La puissance affichée sur chaque spectre correspond à la puissance calculée à  $1480 \pm 10$  nm, à  $1550 \pm 1$  nm ou à  $1585 \pm 1$  nm, et à  $1583 \pm 20$  nm. Les données transmises à 1585 nm sont atténuées de 3 dB en plus par rapport à celles transmises à 1550 nm, à cause du Mux/Démux (1), dont l'entrée est prévue pour la longueur d'onde de 1550 nm. Le circulateur (1) et le coupleur 95/5 (1) étant large bande, ils ne causent pas de pertes supplémentaires.

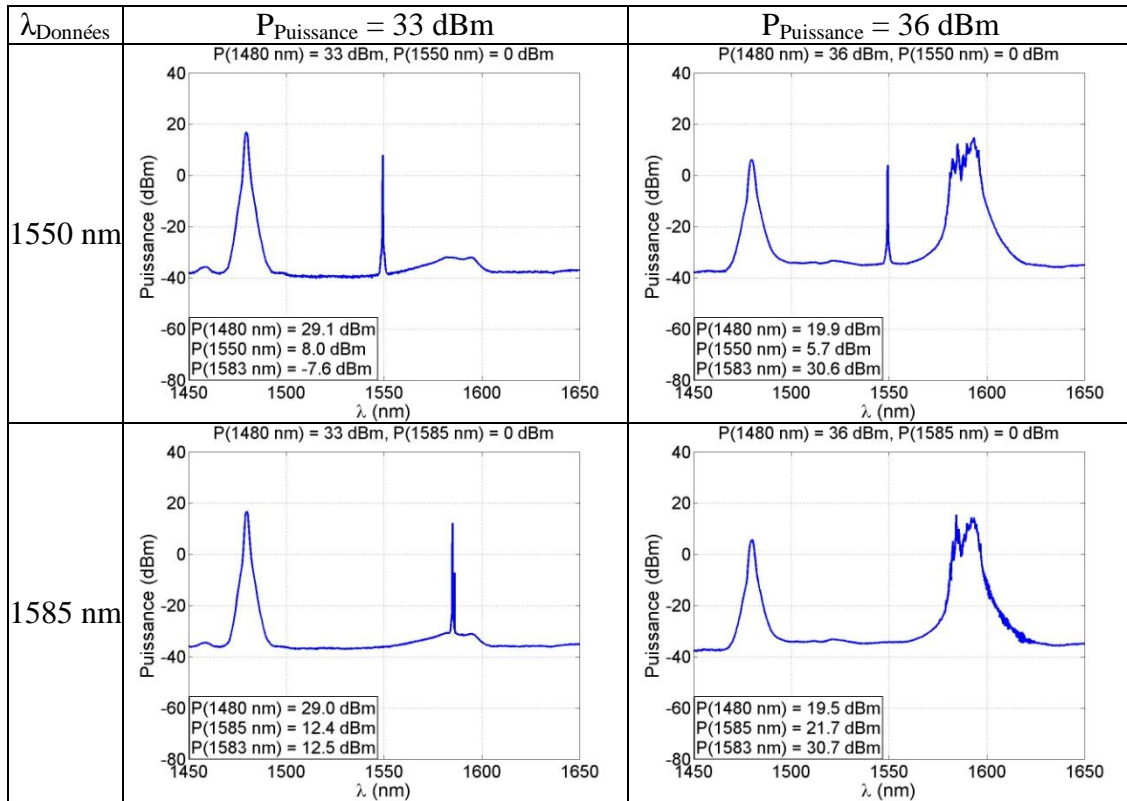


Figure 3.12 : Spectres optiques relevés en sortie de la fibre optique (sortie B) montrant la superposition de l'énergie (@1480 nm) et des données descendantes (@1550 nm ou @1585 nm).

Nous observons que le signal à 1585 nm est davantage amplifié que celui à 1550 nm, comme nous nous y attendions. En effet, dans le cas où la SLHP émet 33 dBm, l'onde de données à 1585 nm passe d'un niveau de -3 dBm (en tenant compte des pertes du Mux/Démux (1)) à 12,4 dBm. Dans le même cas, les données à 1550 nm passent d'un niveau de 0 dBm à seulement 8 dBm.

Cette amplification diminue pour une puissance de la SLHP de 36 dBm car nous obtenons seulement 5,7 dBm au lieu de 8 dBm pour les données à 1550 nm. Ceci est dû à la diminution de la puissance à 1480 nm car la puissance est décalée à 1583 nm par diffusion Raman spontanée amplifiée. Ce transfert se fait au détriment des données car il engendre une diminution de la « réserve d'énergie » à 1480 nm. La pompe, la SLHP dans notre dispositif, génère donc moins de gain à 1550 nm.

En ce qui concerne le signal à 1585 nm, sa puissance passe d'un niveau de -3 dBm à 21,7 dBm lorsque la SLHP émet 36 dBm. Cependant, nous constatons sur la Figure 3.12 que le signal se trouve noyé dans le spectre de l'ASE. À partir de l'équation (3.1), nous estimons à 12,7 dBm la puissance « utile » des données à cette longueur d'onde.

Afin de déterminer plus finement l'évolution de l'amplification en fonction de la puissance de la SLHP, nous devons calculer le gain Raman dans la fibre optique du signal à 1550 nm et à 1585 nm, qu'il soit en co-propagation ou contra-propagation avec l'onde de puissance. Le gain est calculé à partir du rapport entre la puissance du signal mesurée en sortie de la fibre, et celle délivrée en entrée de la fibre. Les mesures sont effectuées, respectivement, aux points  $C_{2D}$  et  $C_{1D}$  pour les données descendantes. Le gain est alors obtenu par l'équation (3.2). Pour les données montantes, il suffit de changer le point  $C_{2D}$  par le point  $C_{1M}$ , et le point  $C_{1D}$  par le point  $C_{2M}$ .

$$\begin{aligned}
G(\text{dB}) = & 10.\log_{10}(P_{i\text{ nm},C2D}^{\text{puissance+données}}(\text{mW}) - P_{i\text{ nm},C2D}^{\text{puissance}}(\text{mW})) \\
& - 10.\log_{10}(P_{i\text{ nm},C1D}^{\text{puissance+données}}(\text{mW}) - P_{i\text{ nm},C1D}^{\text{puissance}}(\text{mW})) \\
& + |\alpha_{i\text{ nm}}(\text{dB})| + |\Delta P_{\text{composants},i\text{ nm}}(\text{dB})|
\end{aligned} \quad (3.2)$$

avec :

$P_{i\text{ nm},X}^L$  la puissance relevée à  $i\text{ nm}$  (1550 nm ou 1585 nm) au point X avec le ou les lasers L en fonction,  
 $\alpha_{i\text{ nm}}$  l'atténuation de la fibre optique à la longueur d'onde de  $i\text{ nm}$ ,  
 $\Delta P_{\text{composants},i\text{ nm}}$  les pertes engendrées par les composants à  $i\text{ nm}$  (1550 nm ou 1585 nm).

Le premier terme entre parenthèses de l'équation (3.2) consiste à calculer la puissance du signal en sortie de la fibre optique, en retirant le bruit dû à la SLHP (comme exposé sur la Figure 3.10). Nous connaissons alors réellement la puissance des données en sortie de la fibre optique. Le second terme calcule la puissance réelle du signal en entrée de la fibre optique, en procédant de la même façon que pour le premier terme. Les troisième et quatrième termes correspondent à, respectivement, l'atténuation de la fibre, et aux pertes provoquées par les coupleurs 95/5.

La Figure 3.13 présente l'évolution du gain Raman dans la fibre optique pour le signal à 1550 nm et à 1585 nm, qu'il soit en co-propagation ou contra-propagation avec l'onde de puissance.

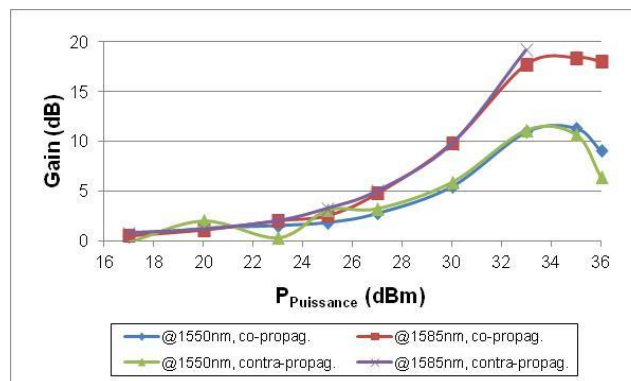


Figure 3.13 : Gain du signal de données apporté par l'amplification Raman dans la fibre optique de 10 km en fonction de la puissance émise par la SLHP pour deux longueurs d'ondes des données (1550 nm et 1585 nm), et pour les cas co- ou contra-propagatifs.

Le Tableau 3.3 présente la comparaison des valeurs de gain du signal co-propagatif aux deux longueurs d'ondes lorsque la puissance du laser de puissance est égale à 30 dBm, 33 dBm et 36 dBm.

	Gain (dB)		
	P <sub>SLHP</sub> = 30 dBm	P <sub>SLHP</sub> = 33 dBm	P <sub>SLHP</sub> = 36 dBm
$\lambda_{\text{Données}} = 1550\text{ nm}$	5,5 dB	11,0 dB	9,0 dB
$\lambda_{\text{Données}} = 1585\text{ nm}$	9,9 dB	17,7 dB	18,0 dB

Tableau 3.3 : Comparaison du gain du signal co-propagatif dans la fibre optique aux longueurs d'ondes de 1550 nm et 1585 nm pour différentes puissances de la SLHP.

Nous devons indiquer que nous ne pouvons pas fournir de résultats pertinents, dans le cas du signal contra-propagatif à 1585 nm et ce, lorsque la puissance de la SLHP est supérieure à 32 dBm. En effet, dans ces conditions, le signal est noyé dans le spectre de l'ASE, et nous ne parvenons pas à mesurer la puissance du signal.

Nous observons sur la Figure 3.13 que le gain Raman est identique pour les signaux co- et contra-propagatifs. Dans tous les cas, le gain commence à augmenter sensiblement lorsque la puissance du laser de puissance dépasse 25 dBm et ce gain atteint son maximum lorsque la puissance égale 34 dBm. La diminution qui survient ensuite est due à la diminution de la puissance autour de 1480 nm due au transfert d'énergie à 1583 nm comme nous l'avons expliqué ci-avant. Nous observons nettement que le gain du signal émis à 1585 nm est bien supérieur à celui de 1550 nm puisqu'il atteint un maximum d'environ 19 dB, tandis que le signal à 1550 nm plafonne à 11 dB.

En tenant compte uniquement du gain du signal, il paraît évident que la longueur d'onde des données devrait être fixée à 1585 nm. Cependant, le niveau de bruit non négligeable engendré par la diffusion Raman à cette longueur d'onde pose problème lorsque la puissance de la SLHP est supérieure à 33 dBm. Nous reviendrons sur ce point au paragraphe suivant lors de l'étude de l'amplification Raman en fonction de la longueur d'onde du signal.

### 3.3.2.b. Amplification Raman en fonction de la longueur d'onde des données

Nous complétons l'étude de l'amplification Raman en mesurant le gain Raman du dispositif en fonction de la longueur d'onde des données. Pour cela, nous employons la source accordable utilisée précédemment, sur la plage de 1540 nm à 1600 nm. La source accordable émet un signal avec une puissance de -3 dBm avec un pas en longueur d'onde de 5 nm. Nous avons réalisé les mesures pour deux puissances différentes de la SLHP : 33 dBm et 36 dBm.

Pour chaque cas, nous avons relevé des spectres aux points de mesures  $C_{1D}$  et  $C_{2D}$  dans le sens descendant, et aux points  $C_{2M}$  et  $C_{1M}$  dans le sens montant. Sur chacun des spectres, nous relevons ensuite la puissance à la longueur d'onde du signal :  $\lambda \pm 0,5$  nm. Nous appliquons ensuite l'équation (3.2) pour calculer le gain du signal dans la fibre optique.

La Figure 3.14(a) montre le gain du signal transmis dans la fibre optique, en co-propagation ou en contra-propagation par rapport à l'onde de puissance, en fonction de la longueur d'onde du signal pour deux puissance de la SLHP. Pour la mesure du gain, il est à noter que nous n'avons pas injecté une puissance constante dans la fibre en fonction de la longueur d'onde car les pertes du Mux/Démux varient entre 0,5 dB et 7,6 dB, entre 1540 nm et 1600 nm (Figure 2.25). Il aurait été nécessaire d'adapter la puissance émise par la source accordable selon les pertes engendrées par ce composant. Cependant, ceci n'est pas possible avec notre source qui ne peut fournir qu'une puissance maximale de -3 dBm sur l'ensemble de la plage en longueur d'onde. Toutefois, nous verrons plus tard (§ 3.4) que le gain Raman se comporte de la même façon quelle que soit la puissance des données. Ainsi, le comportement du Mux/Démux en fonction de la longueur d'onde n'a pas d'influence dans le calcul du gain.

Nous observons que le gain Raman évolue de la même manière quel que soit le sens de propagation des données, ou la valeur de la puissance du laser de puissance. Il est maximum lorsque la longueur d'onde du signal est comprise entre 1580 nm et 1595 nm, avec une valeur allant de 15 et 20 dB.

Nous avons également mesuré le rapport S/B statique (Signal par rapport au Bruit) du signal transmis dans la fibre. Le calcul est donné par l'équation (3.3) pour un signal descendant. Dans le cas d'un signal montant, il faut remplacer l'indice  $C_{2D}$  par  $C_{1M}$ .

$$S / B \text{ (dB)} = 10 \cdot \log_{10} (P_{i \text{ nm}, C2D}^{\text{puissance+données}} \text{ (mW)} - P_{i \text{ nm}, C2D}^{\text{puissance}} \text{ (mW)}) - 10 \cdot \log_{10} (P_{i \text{ nm}, C2D}^{\text{puissance}} \text{ (mW)}) \quad (3.3)$$

avec :

$P_{i \text{ nm}, X}^L$  la puissance relevée à  $i$  nm au point X avec le ou les lasers L en fonction.

Pour comprendre le calcul, nous pouvons nous appuyer à nouveau sur la Figure 3.10. Ces mesures sont représentées sur la Figure 3.14(b). Comme mentionné précédemment, le Mux/Démux a une dépendance en longueur d'onde. Ce comportement perturbe le rapport S/B, légèrement de 1540 nm à 1570 nm, et de manière plus significative de 1570 nm à 1600 nm.

Sur les courbes à 33 dBm, si on avait précompensé la puissance optique injectée dans la fibre pour tenir compte des pertes du Mux/Démux, nous aurions obtenu un rapport S/B de l'ordre de 30 dB (ce qui est conforme aux mesures spectrales sur la Figure 3.12). Pour les courbes à 36 dBm, nous constatons l'influence importante du bruit de l'ASE autour de 1583 nm qui dégrade fortement le rapport S/B. Dans cette zone, il convient de prendre les résultats du rapport S/B avec précaution, car les pertes du Mux/Démux interviennent de manière d'autant plus importante que le bruit est grand. Au vu de ces résultats, il est préférable de ne pas travailler avec une longueur d'onde proche de 1583 nm, lorsque la SLHP émet plus de 33 dBm.

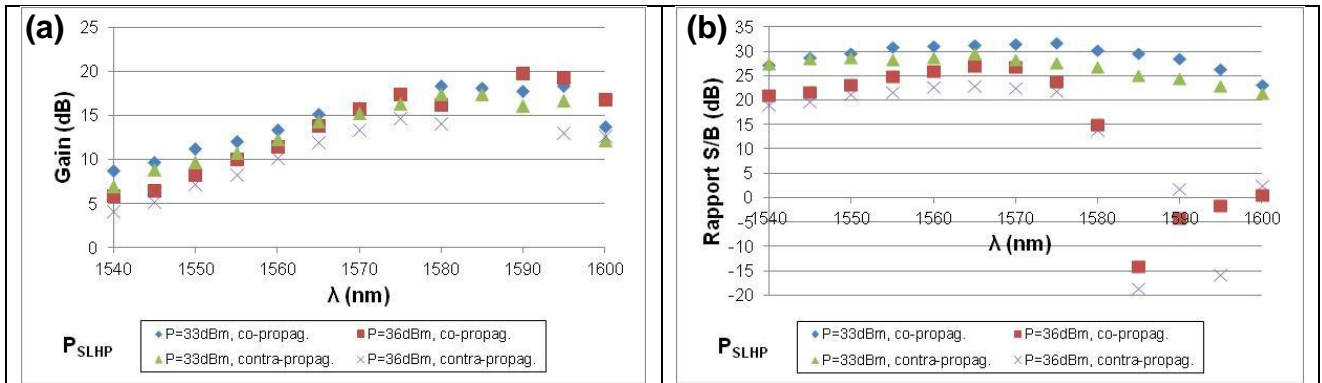


Figure 3.14 : (a) Gain apporté par amplification Raman et (b) rapport S/B statique du signal de données en fonction de la longueur d'onde et pour deux puissances émises par la SLHP (33 dBm et 36 dBm).

Notre objectif est de recueillir le maximum d'énergie afin d'alimenter l'instrument et non d'avoir l'amplification Raman maximum. Nous préférons donc privilégier le fait de pouvoir travailler avec une forte puissance au niveau de la SLHP. Par conséquent, nous avons fait le choix de fixer la longueur d'onde des données à 1550 nm, afin d'obtenir un bon rapport S/B du signal transmis dans notre dispositif. Ainsi, nous pouvons espérer un gain de l'ordre de 10 dB pour les données et un rapport S/B compris entre 20 et 30 dB, sous réserve de filtrer l'ASE avec une bande optique de l'analyseur de spectre optique identique à notre cas (1 nm), pour une SLHP émettant une puissance comprise entre 33 dBm et 36 dBm.

Nous gardons cependant à l'esprit que nous pouvons amplifier davantage le niveau de puissance des données tout en conservant un bon rapport S/B en augmentant légèrement la longueur d'onde jusqu'à 1570 nm si nécessaire. Par contre, si ce dernier choix est fait, il sera nécessaire de changer les Mux/Démux afin que la voie dédiée au signal n'engendre pas de pertes supplémentaires.

À présent que nous avons validé le choix de la longueur d'onde des données, nous pouvons caractériser le dispositif en régime statique, selon les différentes configurations de transmission des données.



### 3.4. Caractérisations : superposition de la puissance et des données

Nous avons validé le choix de la longueur d'onde des données à 1550 nm. Nous souhaitons dorénavant évaluer le comportement des données descendantes et/ou montantes, superposées à la puissance pour cette longueur d'onde. Nous étudions trois configurations de superposition :

- énergie et données descendantes ;
- énergie et données montantes ;
- énergie et données descendantes et montantes.

Dans chaque cas, nous analysons spectralement l'évolution des puissances au niveau des points de réception des données. À partir de ces spectres, nous évaluons le bilan de transmission des données, qui est influencé par l'amplification Raman. Cette étude nous permet de déterminer la puissance optimale à choisir pour les données.

#### 3.4.1. Superposition de la puissance et des données descendantes

Nous avons étudié le comportement des données descendantes, superposées à la puissance en sortie de la fibre optique (au point B). Nous avons ainsi montré qu'il est possible de transmettre parfaitement l'énergie et les données en co-propagation dans la fibre optique. La diffusion Raman stimulée intervient et amplifie la puissance de l'onde contenant les données lors de la propagation sur la fibre optique dès que la puissance de la SLHP dépasse 25 dBm. Afin de caractériser entièrement la propagation des données descendantes dans le dispositif, nous devons étudier les données en sortie du dispositif (au point B<sub>D</sub>).

Dans un premier temps, nous relevons les spectres optiques à la sortie du dispositif afin de réaliser une première observation. La Figure 3.15 présente les spectres optiques mesurés en sortie du dispositif (en B<sub>D</sub>) avec les données descendantes, avec ou sans présence de la puissance de la SLHP. La puissance du laser de données est fixée à 0 dBm. Les puissances de la SLHP choisies ici sont fixées à 30 dBm et à 36 dBm.

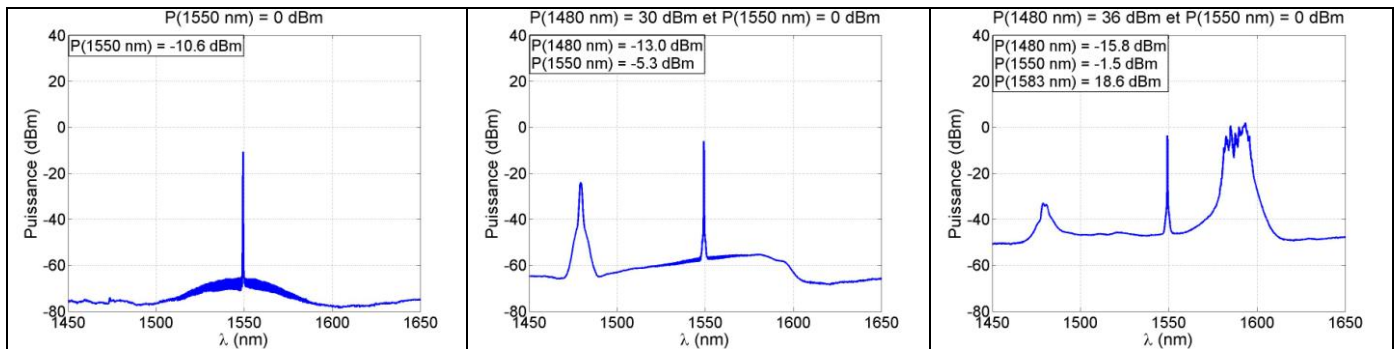


Figure 3.15 : Spectres optiques relevés au point B<sub>D</sub>, avec les données descendantes ( $P_{1550 \text{ nm}} = 0 \text{ dBm}$ ), sans ou en présence de la puissance ( $P_{1480 \text{ nm}} = 30 \text{ dBm}$  ou  $36 \text{ dBm}$ ).

Tout d'abord, nous observons que les données descendantes subissent des pertes de 10,6 dB entre l'entrée du dispositif (en A<sub>D</sub>) et la sortie du dispositif (en B<sub>D</sub>). Ce résultat concorde avec les informations issues de la caractérisation individuelle des composants : nous obtenons en effet par calcul des pertes de 10,5 dB. Les données sont donc transmises correctement sans pertes supplémentaires.

Ensuite, nous observons que la puissance des données est supérieure de 5,3 dB lorsque la SLHP émet 30 dBm, et de 9,1 dB lorsque la SLHP émet 36 dBm. En effet, comme nous l'avons étudié précédemment, les données sont amplifiées dans la fibre par diffusion Raman.

Par ailleurs, le Mux/Démux (2) a correctement filtré la puissance à 1480 nm. Une faible part de cette puissance est présente, de niveau relativement négligeable par rapport à celui des données. Par contre, la puissance de l'ASE autour de 1583 nm surpasse la puissance des données lorsque la SLHP émet 36 dBm. En effet, le Mux/Démux agit comme un coupleur 50/50 et laisse passer la moitié de la puissance incidente autour de 1583 nm dans chaque voie.

Afin d'analyser plus finement le problème posé par la puissance de l'ASE autour de 1583 nm, nous proposons de suivre l'évolution des puissances totales, à 1480 nm, à 1550 nm et à 1583 nm en sortie de la fibre optique (en B) (Figure 3.16(a)), et en sortie du dispositif (en B<sub>D</sub>) (Figure 3.16(b)). Nous analysons l'impact des composants présents entre B et B<sub>D</sub>, en comparant la Figure 3.16(b) à la Figure 3.16(a). Nous indiquons que l'évolution des puissances à 1480 nm et à 1583 nm a déjà été présentée sur la Figure 3.11.

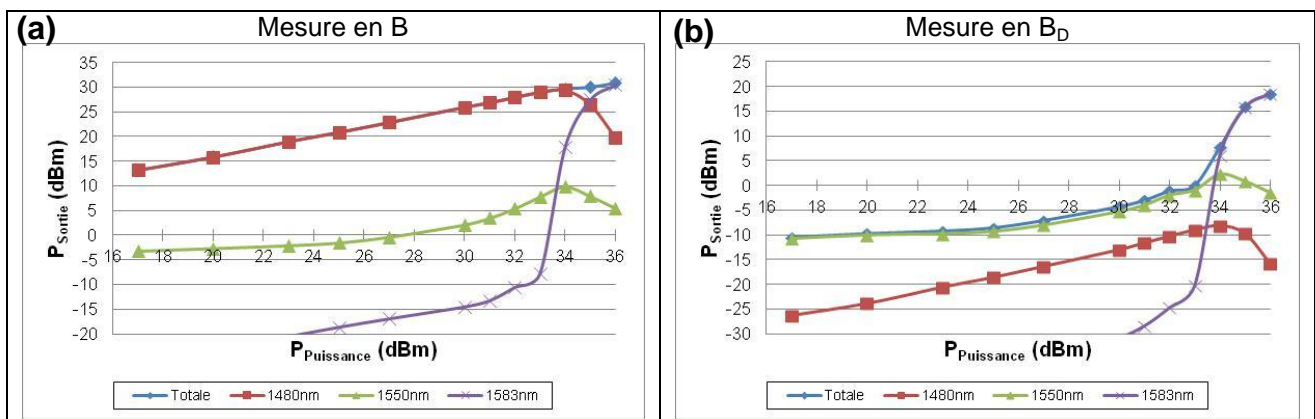


Figure 3.16 : Évolution de la puissance totale pour plusieurs longueurs d'ondes, mesurées (a) au point B et (b) au point B<sub>D</sub>, en fonction de la puissance de la SLHP.

Tout d'abord, la puissance à 1480 nm est atténuée de 40 dB entre B et B<sub>D</sub>, ce qui correspond aux caractéristiques des composants, donnant des pertes de 40,4 dB (Chapitre 2). Ensuite, nous observons que la puissance décalée autour de 1583 nm augmente radicalement pour une puissance de la SLHP supérieure à 33 dBm en B<sub>D</sub>. Étant donné que le Mux/Démux n'est pas dédié à filtrer cette longueur d'onde, il sera donc nécessaire d'utiliser un filtre pour éliminer la puissance qui passe au travers du Mux/Démux sur la voie des données.

Par ailleurs, la Figure 3.16 permet de suivre l'évolution de la puissance des données. Nous mesurons que les pertes occasionnées par les composants entre B et B<sub>D</sub> sont de l'ordre de 7,5 dB. Ce résultat correspond à la somme des pertes, égale à 7,3 dB, dues au coupleur à quatre voies au Mux/Démux et au circulateur.

Afin d'évaluer l'apport de l'amplification Raman, nous proposons de mesurer le bilan de liaison. Il est défini par le rapport entre la puissance mesurée en sortie du dispositif (en B<sub>D</sub>), et la puissance mesurée en entrée du dispositif (en A<sub>D</sub>). Le bilan nous renseigne sur les pertes subies par les données, ou le gain apporté par l'amplification Raman, suite à la propagation dans le dispositif. Le bilan de liaison, noté *Bilan* (dB), est calculé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Bilan}(dB) = & 10.\log_{10}(P_{1550\text{ nm},BD}^{\text{puissance+données}}(mW) - P_{1550\text{ nm},BD}^{\text{puissance}}(mW)) \\ & - 10.\log_{10}(P_{1550\text{ nm},AD}^{\text{données}}(mW)) \end{aligned} \quad (3.4)$$

avec :

$P_{i\text{ nm},X}^L$  la puissance relevée à  $i\text{ nm}$  à la sortie  $X$  avec le ou les lasers  $L$  en fonction.

Le premier terme correspond à la puissance des données à 1550 nm en sortie du dispositif et son calcul consiste à retirer la puissance mesurée à 1550 nm générée par le bruit de la SLHP (Figure 3.10). Le second terme correspond à la puissance des données en entrée du dispositif. La Figure 3.17 présente le bilan de liaison des données, en fonction de la puissance de la SLHP, pour quatre valeurs de puissance émises par le laser de données (-10 dBm, 0 dBm, 3 dBm et 10 dBm).

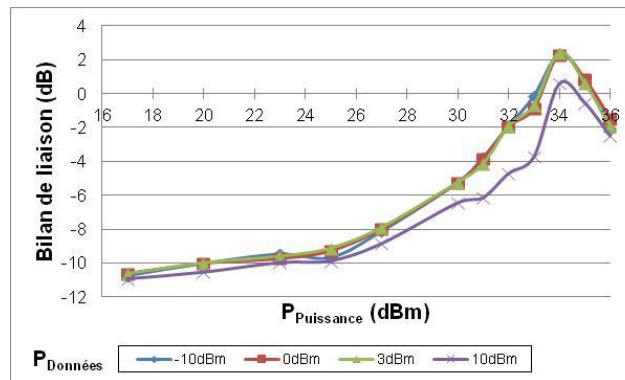


Figure 3.17 : Bilan de liaison des données descendantes établi entre les sorties  $A_D$  et  $B_D$  en fonction de la puissance émise par le laser de puissance et de celle émise par le laser de données.

Nous constatons que le bilan de liaison est similaire dans le cas où les données sont émises avec les puissances de -10 dBm, 0 dBm et 3 dBm. Le gain est donc identique pour ces puissances. Nous observons que l'amplification Raman est effective dès que la puissance du laser de puissance dépasse 25 dBm et cela jusqu'à 34 dBm. Le gain apporté est suffisamment grand pour compenser les différentes atténuations et pertes optiques subies par les données. Lorsque la puissance de la SLHP égale 34 dBm, le bilan atteint un maximum de 2,3 dB. Il est à noter que cette valeur tombe à 0,6 dB dans le cas où la puissance du laser de données est égale à 10 dBm. Ceci est vraisemblablement dû à la saturation du gain Raman car la « réserve d'énergie » à 1480 nm n'est pas suffisante pour amplifier de la même manière les données à 1550 nm. Dans ce cas, la puissance transmise sature [Agrawal 01]. Il est donc préférable d'éviter d'augmenter la puissance à 10 dBm, afin de profiter au maximum de l'amplification Raman. Par contre, l'amplification diminue lorsque la puissance du laser de puissance dépasse 34 dBm car la diffusion Raman spontanée amplifiée engendre un transfert conséquent de l'énergie de 1480 nm autour de 1583 nm. La « réserve d'énergie » pour l'amplification de l'onde portant les données diminue alors.

En conclusion, nous avons observé que les données descendantes se propagent correctement dans le dispositif. Les pertes subies lors de la propagation, égales à 10,6 dB, sont réduites grâce à l'amplification Raman. Ce phénomène est effectif lorsque la SLHP émet entre 25 dBm et 36 dBm. Il permet d'ailleurs de surcompenser les pertes entre 33 dBm et 35 dBm émis par la SLHP. Étant donné les résultats obtenus, nous choisissons de fixer la puissance du laser de données descendantes à 0 dBm. En effet, cette puissance est disponible

par des sources à relative basse consommation et permet de profiter au mieux de l'amplification.

Néanmoins, la diffusion Raman engendre de l'ASE autour de 1583 nm, qui devient conséquent à partir de 34 dBm émis par la SLHP. D'une part, ceci peut diminuer le gain Raman sur les données à 1550 nm. D'autre part, cette puissance, n'étant pas filtrée par le Mux/Démux, elle est supérieure à celle des données dans ce cas. Nous devons donc utiliser un filtre optique afin de ne pas trop bruyter les données lors de la conversion O/E au niveau du terminal.

### 3.4.2. Superposition de la puissance et des données montantes

Nous continuons la caractérisation du dispositif en étudiant le comportement des données montantes. Comme dans la partie précédente, nous vérifions que les données se propagent correctement dans le dispositif et nous évaluons l'effet de l'amplification Raman sur celles-ci. Pour ces expériences, le laser DFB est connecté à l'entrée des données montantes du dispositif (point  $A_M$ ). Dans le sens montant, la sortie du dispositif correspond au point  $B_M$  (Figure 3.1).

Lors de l'étude de l'optimisation de l'amplification Raman et du choix de la longueur d'onde des données, nous avons déjà montré que les données montantes sont amplifiées de la même façon que les données descendantes en sortie de la fibre optique. Nous nous intéressons maintenant au dispositif entier.

Dans un premier temps, nous relevons des spectres optiques en sortie du dispositif (point  $B_M$ ). La Figure 3.18 présente quelques exemples de spectres optiques, sans ou en présence de la puissance. Dans ce cas, la puissance de la SLHP est fixée à 30 dBm ou à 36 dBm. La puissance du laser de données est fixée à 0 dBm.

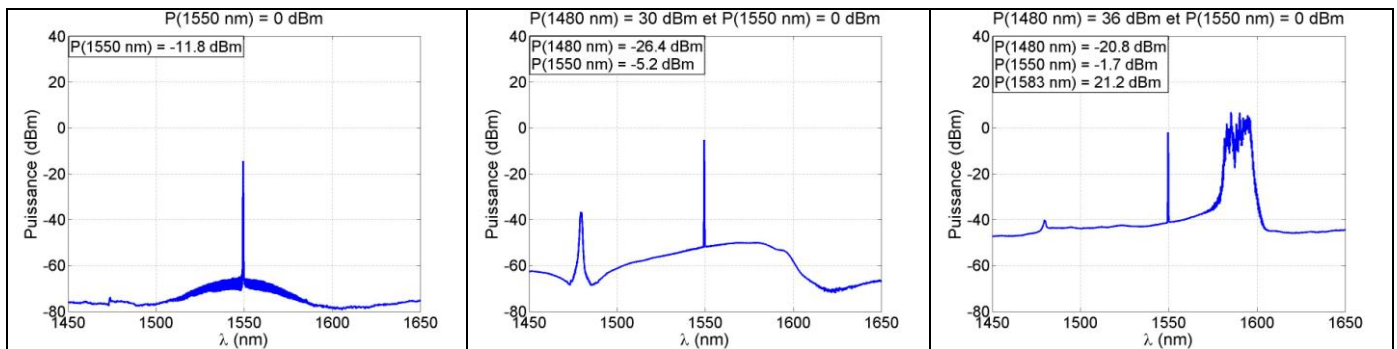


Figure 3.18 : Spectres optiques relevés au point  $B_M$ , avec les données montantes ( $P_{1550\text{ nm}} = 0\text{ dBm}$ ), sans ou en présence de la puissance ( $P_{1480\text{ nm}} = 30\text{ dBm}$  ou  $36\text{ dBm}$ ).

Nous constatons que les résultats obtenus sont identiques à ceux présentés pour les données descendantes. Les données montantes subissent des pertes de 11,8 dB lorsque la SLHP n'est pas en fonction. Cette valeur correspond aux valeurs relevées lors de la caractérisation des composants, soit 11,1 dB. Ensuite, les données montantes sont amplifiées lorsque la SLHP est en fonction. La puissance des données atteint -5,2 dBm lorsque la SLHP émet 30 dBm, et -1,7 dBm lorsque la SLHP émet 36 dBm.

Nous constatons également que l'ASE autour de 1583 nm existe en sortie du dispositif lorsque la SLHP émet 36 dBm. Nous avons effectivement observé que de la puissance à 1480 nm et que de la puissance de l'ASE autour de 1583 nm sont rétrodiffusées par la fibre. Le niveau de puissance rétrodiffusée croît à mesure que la puissance de la SLHP augmente.

Ainsi, de la même manière que pour les données descendantes, le Mux/Démux (1) sépare bien les ondes à 1480 nm et à 1550 nm, mais laisse passer en revanche la moitié de la puissance autour de 1583 nm dans chaque voie. Nous obtenons donc au final un niveau pour la puissance autour de 1583 nm qui dépasse celui des données.

Nous avons également mesuré les puissances totales, à 1480 nm, à 1550 nm et à 1583 nm. La Figure 3.19 présente l'évolution des puissances relevées sur les spectres optiques, sur l'ensemble du spectre, à 1480 nm, à 1550 nm et à 1583 nm. Nous conservons la puissance du laser de données fixée à 0 dBm. Les mesures sont données en sortie du dispositif (en  $B_M$ ), et en sortie de la fibre dans le sens montant (en  $F_M$ ). Pour cette sortie, nous avons relevé les spectres au point  $C_{IM}$ , et nous avons mesuré les puissances en tenant compte du couplage pour remonter à la puissance en sortie de la fibre. Nous pouvons ainsi observer l'effet du Mux/Démux.

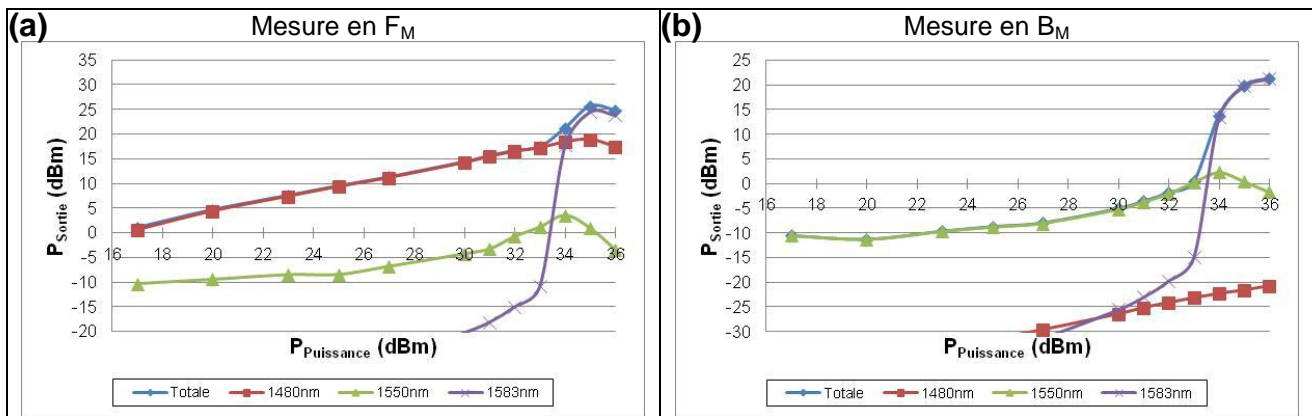


Figure 3.19 : Évolution de la puissance totale pour plusieurs longueurs d'ondes, mesurées (a) au point  $F_M$  (mesure en  $C_{IM}$  en tenant compte du couplage) et (b) au point  $B_M$ , en fonction de la puissance de la SLHP.

En observant ces figures, nous pouvons reprendre l'essentiel des remarques faites dans le cadre des données descendantes. Ainsi, nous observons que la puissance des données augmente lorsque la puissance de la SLHP est comprise entre 17 et 34 dBm. Elle atteint un maximum de 2,3 dBm en sortie du dispositif. Puis la puissance du signal à 1550 nm diminue lorsque la puissance de la SLHP est supérieure à 34 dBm. En effet, la puissance à 1480 nm, source de l'amplification à 1550 nm, se réduit à cause du transfert de puissance autour de 1583 nm par diffusion Raman spontanée amplifiée.

Nous constatons également que le Mux/Démux (1) isole correctement la voie des données montantes de la puissance à 1480 nm. D'après ces mesures, l'isolation est égale à 39,2 dB, ce qui est satisfaisant étant donné la puissance rétrodiffusée à cette longueur d'onde.

Mais, ce Mux/Démux laisse passer la moitié de la puissance incidente à 1583 nm vers le point  $B_M$ , dédié aux données. Nous constatons que cette puissance autour de 1583 nm augmente nettement à partir de 33 dBm émis par la SLHP. Il est donc nécessaire d'installer un filtre optique à la longueur d'onde des données à la sortie du dispositif.

Comme précédemment, nous calculons le bilan de liaison des données, cette fois montantes, de sorte à déterminer la puissance optimale de la SLHP dans notre dispositif. Nous employons l'équation (3.4) présentée auparavant, en remplaçant les indices  $A_D$  et  $B_D$  par, respectivement,  $A_M$  et  $B_M$ .

La Figure 3.20 présente le bilan de liaison des données montantes provenant de ce calcul. Nous avons réalisé des mesures en employant trois niveaux de puissance au niveau du laser de données : -10 dBm, 0 dBm et 3 dBm. Nous n'élevons pas la puissance au-delà car le laser



situé au niveau du terminal disposera d'une faible énergie, et émettra donc une faible puissance de l'ordre de 0 dBm, voire moins.

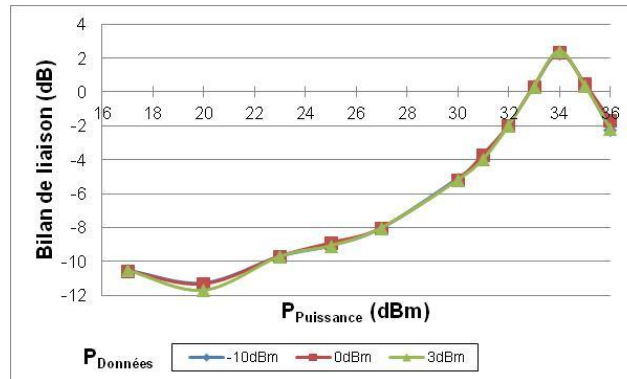


Figure 3.20 : Bilan de liaison des données montantes, établi entre les points  $A_M$  et  $B_M$  en fonction de la puissance émise par la SLHP et de celle émise par le laser de données.

Nous remarquons que le bilan de liaison des données montantes est similaire à celui des données descendantes (Figure 3.17). Le bilan de liaison est identique pour toutes les puissances du laser de données employées. Les pertes subies par les données sont compensées à mesure que l'on augmente la puissance de la SLHP, jusqu'à ce que celle-ci atteigne 34 dBm. Puis l'amplification diminue, entre 34 dBm et 36 dBm émis par la SLHP. L'amplification est d'ailleurs suffisante pour surcompenser les pertes du dispositif, lorsque la SLHP émet entre 33 dBm et 35 dBm. Les données ont alors un gain maximum de 2,4 dB, lorsque la SLHP émet 34 dBm.

Donc, l'étude du comportement des données montantes en sortie du dispositif nous amène aux mêmes conclusions que pour les données descendantes. Les données montantes sont donc amplifiées par diffusion Raman et les pertes du dispositif sont compensées, voire surcompensées. Nous avons observé que l'amplification est identique pour une puissance du laser de données comprise entre -10 dBm et 3 dBm. Nous choisissons de fixer la puissance du laser de données montantes à -3 dBm pour la suite. Cette puissance correspond à celle émise par le laser prévu pour le dispositif final. Et nous profiterons de la même façon de l'amplification Raman.

Par ailleurs, la puissance de l'ASE autour de 1583 nm et rétrodiffusée est importante lorsque la puissance de la SLHP est supérieure à 33 dBm. Comme dans le cas des données descendantes, nous devons installer un filtre optique à la longueur d'onde des données pour les isoler de la puissance à 1583 nm.

### 3.4.3. Superposition de la puissance et des données descendantes et montantes

Nous allons à présent transmettre simultanément l'énergie et les données descendantes et montantes. Le dispositif expérimental utilisé est celui présenté sur la Figure 3.1. Le laser de données descendantes est le laser DFB émettant à 1549,5 nm (noté par la suite à 1550 nm). Pour cette phase de test, le laser de données montantes est la source accordable Photonetics Tunics, couvrant la plage de 1540 nm à 1620 nm. La longueur d'onde de cette source est fixée à 1551 nm et correspond à celle du laser faiblement consommant prévu pour une première version du prototype.

Notre objectif consiste toujours à étudier le comportement de la puissance et des données, et à évaluer l'amplification subie par les données.

Tout d'abord, nous présentons des exemples de spectres relevés aux sorties des données (points  $B_D$  et  $B_M$ ). La Figure 3.21 présente les spectres optiques relevés sur la sortie des données descendantes (point  $B_D$ ) et la Figure 3.22 présente les spectres optiques relevés sur la sortie des données montantes (point  $B_M$ ). Nous montrons dans un premier temps le spectre sur une plage de longueur d'onde de 1450 nm à 1650 nm, puis dans un second temps sur la plage de 1540 nm à 1560 nm afin de mieux visualiser les deux signaux portant les données. La puissance du laser de puissance est fixée à 30 dBm ou à 36 dBm. La puissance du laser des données descendantes est fixée à 0 dBm et celle du laser des données montantes est fixée à -3 dBm.

Nous observons que les deux signaux de données sont correctement transmis vers leur sorties respectives. La puissance est transmise aux différentes sorties de la même façon que lorsque nous superposons l'énergie et les données descendantes ou montantes.

Cependant, on note la présence d'une puissance, correspondant à la longueur d'onde des données descendantes, sur la sortie  $B_M$ . De même, de la puissance, correspondant à la longueur d'onde des données montantes, se retrouve sur la sortie  $B_D$ . Le « résidu » des données montantes possède une très faible puissance au point  $B_D$ . Nous relevons une différence de puissance de 26,6 dB entre les deux pics de données lorsque la SLHP émet 36 dBm. Par contre un « résidu » important des données descendantes est présent au point  $B_M$ . Nous relevons ainsi une différence de puissance de 13,6 dB entre les deux pics de données dans le cas de 30 dBm émis par la SLHP, et une différence de 7,4 dB lorsque la SLHP émet 36 dBm. Dans ces conditions, il faudra un filtre très sélectif au niveau du point  $B_M$  pour isoler les données montantes.

La différence de puissance des « résidus » des données descendantes et montantes provient du fait que le dispositif est asymétrique, en raison de la présence du coupleur à quatre voies. Les données descendantes se propagent dans la fibre et sont rétrodiffusées. Cette puissance rétrodiffusée est ensuite dirigée vers la sortie  $B_M$ . Par contre, les données montantes sont d'abord atténuées d'environ 6 dB par le coupleur à quatre voies, avant de se propager dans la fibre. Puis les données montantes rétrodiffusées sont atténuées de nouveau par le coupleur à quatre voies avant d'être dirigées vers la sortie  $B_D$ . De plus, il y a un écart de 3 dB entre le niveau des données à 1550 nm et à 1551 nm.

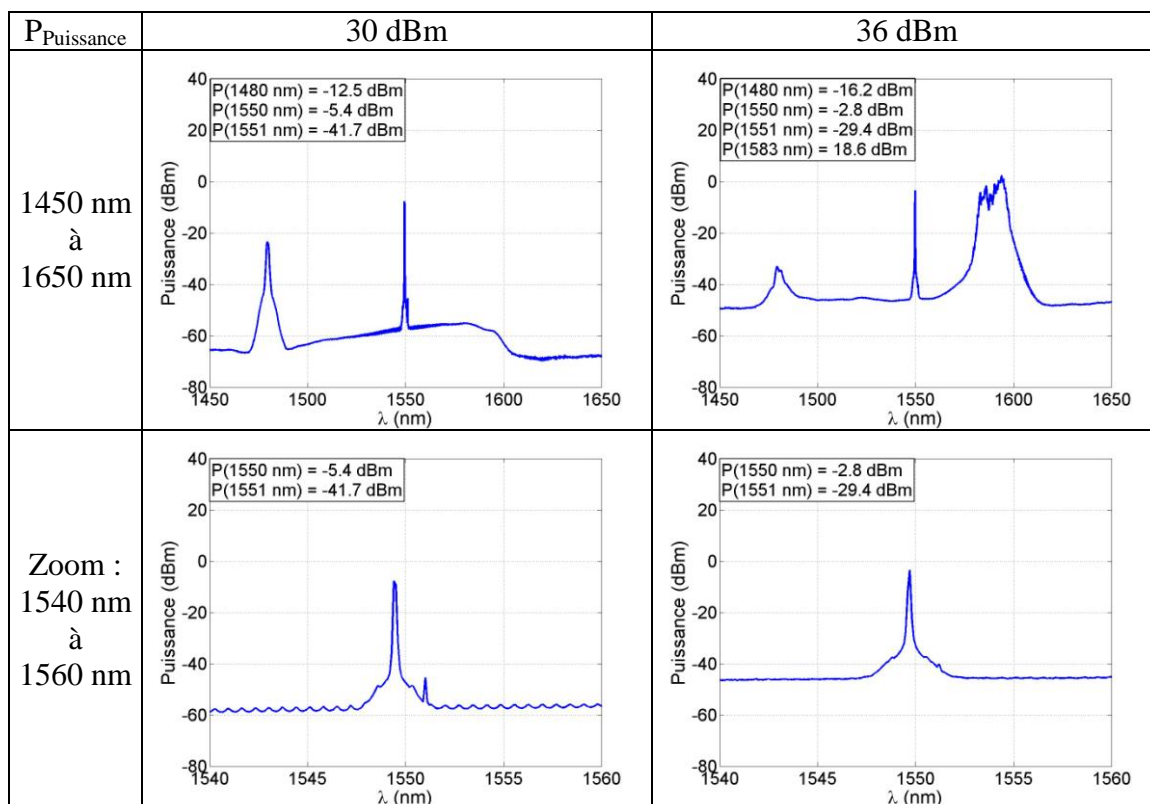


Figure 3.21 : Spectres optiques relevés en sortie  $B_D$ , avec des données descendantes ( $P_{1550 \text{ nm}} = 0 \text{ dBm}$ ) et montantes ( $P_{1551 \text{ nm}} = -3 \text{ dBm}$ ) et pour deux puissances différentes ( $P_{1480 \text{ nm}} = 30 \text{ dBm}$  ou  $36 \text{ dBm}$ ).

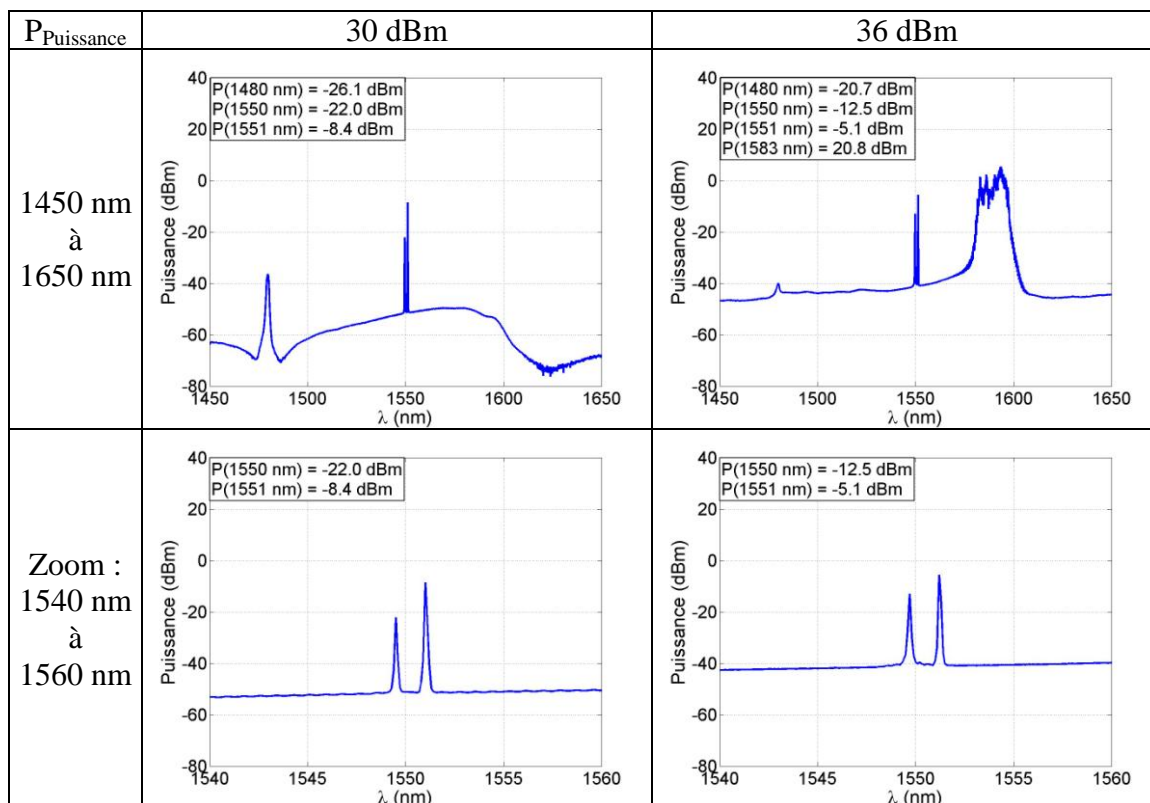


Figure 3.22 : Spectres optiques relevés en sortie  $B_M$ , avec des données descendantes ( $P_{1550 \text{ nm}} = 0 \text{ dBm}$ ) et montantes ( $P_{1551 \text{ nm}} = -3 \text{ dBm}$ ) et pour deux puissances différentes ( $P_{1480 \text{ nm}} = 30 \text{ dBm}$  ou  $36 \text{ dBm}$ ).



Nous proposons de compléter cette étude en mesurant les puissances totales, à 1480 nm, à 1550 nm, à 1551 nm et à 1583 nm aux points  $B_D$  et  $B_M$ , en fonction de la puissance de la SLHP. La Figure 3.23 présente ces évolutions de puissance. La puissance du laser de données descendantes est fixée à 0 dBm et la puissance du laser de données montantes est fixée à -3 dBm. Nous ne représentons pas la puissance rétrodiffusée à 1551 nm au point  $B_D$  car elle est trop faible pour être mesurable.

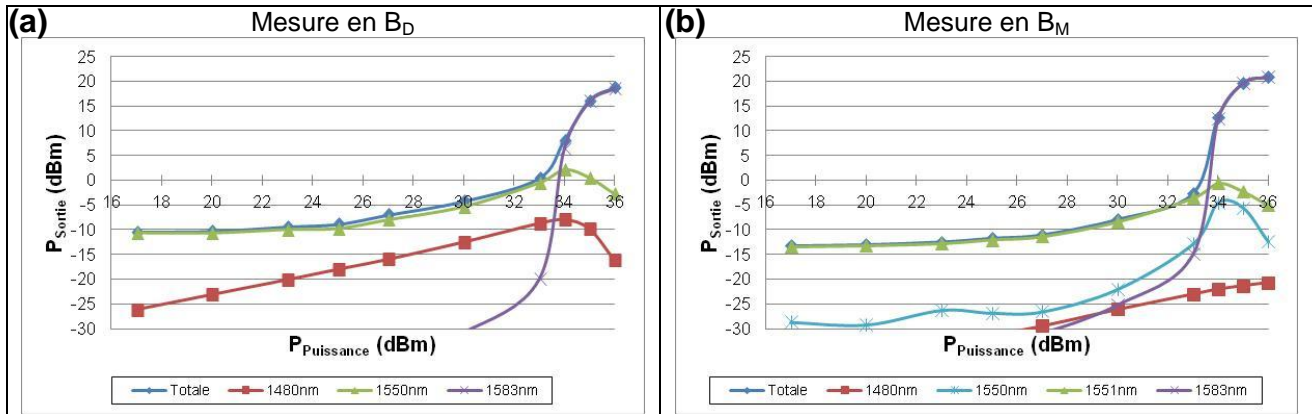


Figure 3.23 : Évolution de la puissance totale pour plusieurs longueurs d'ondes, mesurées (a) au point  $B_D$  et (b) au point  $B_M$ , en fonction de la puissance de la SLHP.

Nous constatons que la puissance à 1480 nm et la puissance décalée autour de 1583 nm évoluent de manière similaire aux cas des transmissions précédentes (superposition de la puissance et des données descendantes ou montantes). Nous observons également le même comportement pour les données transmises.

Cependant, nous observons que la puissance des données descendantes rétrodiffusées en  $B_M$  augmente plus rapidement que la puissance des données montantes, à mesure que la puissance de la SLHP augmente. La puissance rétrodiffusée est d'abord inférieure à -25 dBm. Mais elle augmente ensuite dès lors que la puissance de la SLHP dépasse 28 dBm. L'onde rétrodiffusée est ainsi amplifiée par diffusion Raman. Nous notons à nouveau que nous devons utiliser un filtre optique très sélectif si la puissance de la SLHP est supérieure à 30 dBm.

Afin de vérifier que la superposition des données échangées n'a pas influencé la valeur du gain Raman, nous calculons le bilan de liaison des données descendantes et montantes. Nous appliquons le calcul de l'équation (3.4) entre les points  $A_D$  et  $B_D$  pour le sens descendant, et entre les points  $A_M$  et  $B_M$  pour le sens montant. Nous présentons l'évolution du bilan de liaison pour les données descendantes (Figure 3.24(a)) et les données montantes (Figure 3.24(b)), en fonction de la puissance de la SLHP et de la puissance des lasers de données. Nous avons choisi de fixer la puissance du laser de données descendantes à -10 dBm puis à 0 dBm. La puissance du laser de données montantes est, elle, fixée à -10 dBm puis à -3 dBm.

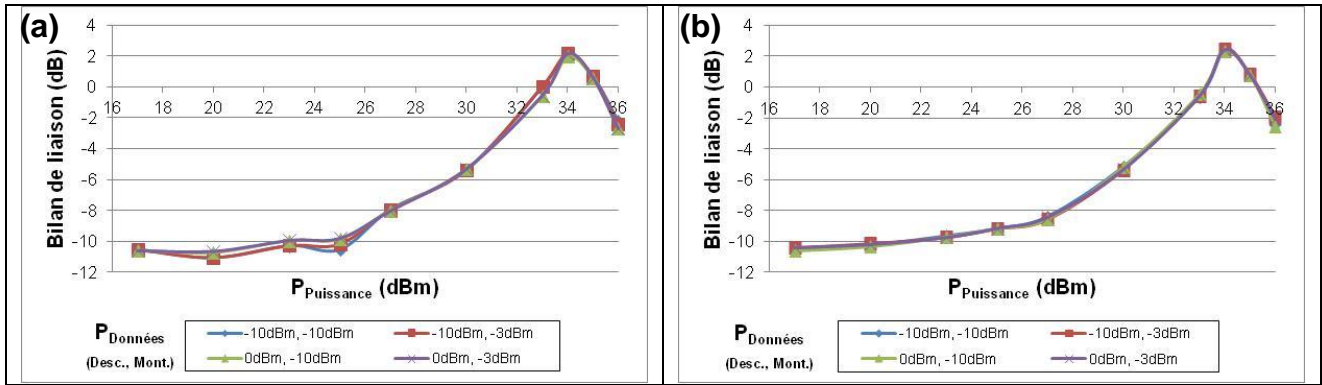


Figure 3.24 : Bilan de liaison (a) des données descendantes établi entre les points  $A_D$  et  $B_D$  et (b) des données montantes établi entre les points  $A_M$  et  $B_M$ , en fonction de la puissance de la SLHP et pour différentes configurations des puissances des lasers de données.

Les bilans de liaison mesurés sont identiques à ceux obtenus dans le cas où un seul signal portant les données était superposé à l'énergie. Donc le fait de transmettre simultanément les données descendantes et montantes n'a pas d'incidence sur le gain Raman apporté à ces signaux. En effet, la saturation du gain n'est jamais atteinte car le cumul de la puissance pour les données reste en dessous de 10 dBm.

Cette expérience conclut l'étude du dispositif expérimental en régime statique. Nous avons montré qu'il est possible de transmettre l'énergie et les données descendantes et montantes ensemble dans la fibre optique longue de 10 km. Les données sont amplifiées de manière similaire, quelles que soient leur direction ou leur puissance, ou encore avec ou sans les données contra-propagatives. Le gain Raman, dans notre application, dépend seulement de la puissance de la SLHP et il permet de compenser l'atténuation de la fibre et les pertes d'insertion des composants. Nous avons relevé que le gain reste identique lorsque le cumul de puissance pour les données reste en dessous de 10 dBm. À partir de ces résultats, nous choisissons de fixer la puissance des données descendantes à -3 dBm ou 0 dBm, et la puissance des données montantes à -3 dBm. Car, d'une part, ces puissances sont pertinentes dans le cas de lasers faiblement consommateurs. Et d'autre part, le gain Raman ne subit pas de saturation à ces puissances.

Néanmoins, nous avons souhaité valider ces résultats par une analyse théorique. Dans ce qui suit, nous établissons un modèle afin de calculer l'évolution de la puissance optique que ce soit pour la SLHP ou les données descendantes et/ou montantes, ainsi que pour l'ASE générée par effet Raman. Pour cela, nous formulons les phénomènes décrits dans le second chapitre : la diffusion Raman stimulée et spontanée amplifiée, la diffusion Brillouin et la diffusion Rayleigh. Nous pourrions ainsi décrire l'impact de chaque phénomène sur la puissance des ondes transmises.

### 3.5. Modélisation des phénomènes optiques dans notre dispositif

Lors de la caractérisation expérimentale de notre dispositif, nous avons mis en évidence un certain nombre de phénomènes qui font que les données en présence de la puissance ne se propagent pas sans être perturbées ou amplifiées. Une étude théorique semble nécessaire pour analyser l'ensemble de ces phénomènes, en particulier leur évolution dans différentes situations selon la puissance de la SLHP. Nous nous intéressons à la diffusion Raman, qui est le principal phénomène intervenant lors de la propagation, et également à la diffusion Brillouin et à la double rétrodiffusion Rayleigh.

Notre but est de mettre en équation l'évolution de la puissance de chaque onde observée tout au long de sa propagation et de comparer les résultats théoriques aux résultats expérimentaux. Nous pourrions ainsi comprendre la contribution de chaque phénomène physique sur l'évolution des puissances optiques.

#### 3.5.1. La diffusion Raman

Dans un premier temps, nous nous intéressons au phénomène observé lors des expériences précédentes : la diffusion Raman. Nous devons tout d'abord calculer le coefficient de gain Raman  $g_R$ , dû à la SLHP, aux longueurs d'ondes des données et de l'ASE engendrée par la SLHP autour de 1583 nm. Puis, nous détaillons les équations de propagation des ondes dans le cas de la diffusion Raman stimulée et de la diffusion Raman spontanée. Dans le modèle proposé, nous tenons compte uniquement du décalage Stokes, car le décalage anti-Stokes est plus faible de plusieurs ordres de grandeur par rapport au décalage Stokes.

##### 3.5.1.a. Le coefficient de gain Raman

La diffusion Raman dans une fibre optique est caractérisée par le gain Raman, qui dépend de l'aire effective de la fibre optique  $A_{\text{eff}}$  et du coefficient de gain Raman  $g_R$ . Ce coefficient s'exprime en  $\text{m.W}^{-1}$  et dépend du matériau de la fibre et de la longueur d'onde de la pompe, notée  $\lambda_P$ . Nous avons besoin de le connaître dans le cadre de notre application afin de calculer l'amplification des données et de l'ASE se propageant dans la fibre. La courbe de gain expérimental pour une fibre en silice pure a été établie par R.H. Stolen [Stolen 72]. La Figure 3.25 présente l'exemple du spectre du coefficient de gain Raman d'une fibre optique en silice avec  $\lambda_P = 1 \mu\text{m}$ .

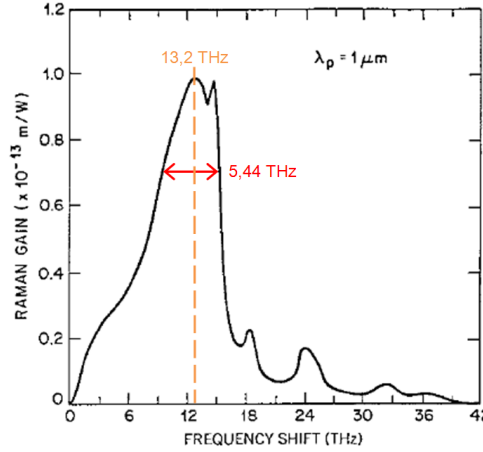


Figure 3.25 : Spectre du coefficient de gain Raman d'une fibre optique en silice avec  $\lambda_p = 1 \mu\text{m}$ , en fonction du décalage en fréquence par rapport à la fréquence pompe [Stolen 72, Agrawal 02].

Le coefficient de gain  $g_R$  varie en fonction du décalage fréquentiel entre une onde signal amplifiée, de fréquence  $\nu_S$ , et l'onde pompe, de fréquence  $\nu_P$ , c'est-à-dire du décalage  $\nu_S - \nu_P$ . Le coefficient de gain présente un maximum pour l'écart en fréquence propre à la silice égal à  $\nu_{\text{SiO}_2} = 13,2 \text{ THz}$ , avec une largeur de bande à mi-hauteur en amplitude égale à  $5,44 \text{ THz}$  (soit à  $1/\sqrt{2}$  du gain maximum). Cette fréquence, correspondant au gain maximal, est appelée dans la suite la fréquence Stokes  $\nu_{\text{Stokes}}$ , et est donc obtenue avec le calcul suivant :

$$\nu_{\text{Stokes}} = \nu_P - \nu_{\text{SiO}_2} \quad (3.5)$$

Nous pouvons donc en déduire aisément la longueur d'onde Stokes  $\lambda_{\text{Stokes}}$ , en fonction de la longueur d'onde de la pompe correspondante  $\lambda_P$ , avec le calcul ci-après :

$$\lambda_{\text{Stokes}} = \frac{1}{(1/\lambda_P) - (c/\nu_{\text{SiO}_2})} \quad (3.6)$$

Le spectre du coefficient de gain Raman (Figure 3.25) présente toujours la même allure en fonction du décalage fréquentiel pour une fibre en silice. Mais les valeurs du coefficient de gain dépendent de la longueur d'onde de la pompe. Il est cependant possible de déterminer les valeurs de ce spectre pour une autre longueur d'onde pompe, si nous avons à notre disposition un spectre donné. En effet, le coefficient de gain Raman est inversement proportionnel à la longueur d'onde Stokes [Chluda 06] :

$$g_R \propto \frac{1}{\lambda_{\text{Stokes}}} \quad (3.7)$$

Nous pouvons nous appuyer sur des mesures expérimentales pour réaliser ce calcul. R.H. Stolen et C. Lee ont obtenu en 1984 la valeur maximale du gain Raman de  $1,86 \cdot 10^{-13} \text{ m.W}^{-1}$ , la longueur d'onde de la pompe étant fixée à  $532 \text{ nm}$  [Stolen 84]. En utilisant l'équation (3.7), nous pouvons en déduire une valeur fréquemment utilisée comme référence pour le calcul du coefficient de gain Raman : celui-ci est maximal avec une valeur d'environ  $1,0 \cdot 10^{-13} \text{ m.W}^{-1}$  pour une longueur d'onde Stokes de  $1000 \text{ nm}$ .

Nous ne disposons pas de mesure expérimentale du coefficient de gain Raman, dans le cas de notre dispositif. Afin d'estimer le spectre du coefficient de gain Raman dans le cadre de notre application, nous devons rechercher un modèle théorique. Nous avons choisi d'utiliser un modèle mis en place par D. Hollenbeck [Hollenbeck 02]. Ce modèle consiste à assimiler la

fibres optiques à un oscillateur harmonique, possédant plusieurs modes vibrationnels. En fait, K.J. Blow a tout d'abord proposé un modèle composé d'un seul mode vibrationnel, en définissant le gain avec une forme Lorentzienne [Blow 89]. Or, les molécules de SiO<sub>2</sub> constituant la fibre optique comportent en réalité plusieurs modes vibrationnels. Afin de modéliser ces modes, G.E. Walfaren a ensuite proposé de décomposer le spectre du coefficient de gain Raman en une superposition de treize Gaussiennes, chacune d'entre elles correspondant elle-même en la superposition de Lorentziennes [Walrafen 82]. D. Hollenbeck a amélioré ce dernier modèle en faisant correspondre chacun des treize modes à un mélange de Lorentziennes et de Gaussiennes. Le Tableau 3.4 donne les valeurs utilisées pour chacun des modes vibrationnels  $i$  :  $CP$  illustre le décalage en fréquence (noté ici par rapport au nombre d'onde),  $A_i$  est la valeur maximale,  $GF$  représente la largeur à mi-hauteur de la Gaussienne et  $LF$ , la largeur à mi-hauteur de la Lorentzienne. Les valeurs indiquées correspondent à la fibre optique en silice [Chluda 06].

Mode $i$	Position $CP$ (cm <sup>-1</sup> )	Valeur Max $A_i$ (m.W <sup>-1</sup> )	FWHM Gaussienne $GF$ (cm <sup>-1</sup> )	FWHM Lorentzienne $LF$ (cm <sup>-1</sup> )
1	56,25	1,00	52,10	17,37
2	100,00	11,40	110,42	38,81
3	231,25	36,67	175,00	58,33
4	362,50	67,67	162,50	54,17
5	463,00	74,00	135,33	45,11
6	497,00	4,50	24,50	8,17
7	611,50	6,80	41,50	13,83
8	691,67	4,60	155,00	51,67
9	793,67	4,20	59,50	19,83
10	835,50	4,50	64,30	21,43
11	930,00	2,70	150,00	50,00
12	1080,00	3,10	91,00	30,33
13	1215,00	3,00	160,00	53,33

Tableau 3.4 : Valeurs des paramètres utilisés pour le modèle du coefficient de gain Raman [Hollenbeck 02].

Le coefficient de gain Raman correspondant à la superposition de ces treize modes vibrationnels est modélisé par l'équation suivante (3.8).

$$g_R(\omega) = \sum_{i=1}^{13} \frac{A'_i}{2\omega_{v,i}} \int_0^\infty \left\{ \cos[(\omega_{v,i} - \omega)t] \cos[(\omega_{v,i} + \omega)t] \right\} e^{-\gamma_i t} \cdot e^{-\Gamma_i^2 t^2 / 4} dt \quad (3.8)$$

avec :

$$\omega_{v,i} = 2\pi c \cdot CP \quad (3.9)$$

$$\frac{A'_i}{\omega_{v,i}} = A_i \quad (3.10)$$

$$\Gamma_i = \pi c \cdot GF \quad (3.11)$$

$$\gamma_i = \pi c \cdot LF \quad (3.12)$$

où  $\omega_{v,i}$  représente la pulsation du  $i^{\text{ème}}$  mode vibrationnel,  $A'_i$  est l'amplitude correspondante,  $\Gamma_i$  est la largeur à mi-hauteur de la raie Gaussienne,  $\gamma_i$  est la largeur à mi-hauteur de la raie

Lorentzienne et  $c$  la vitesse de la lumière. La Figure 3.26 représente le coefficient de gain Raman normalisé, avec les treize pics associés aux modes vibrationnels se superposant.

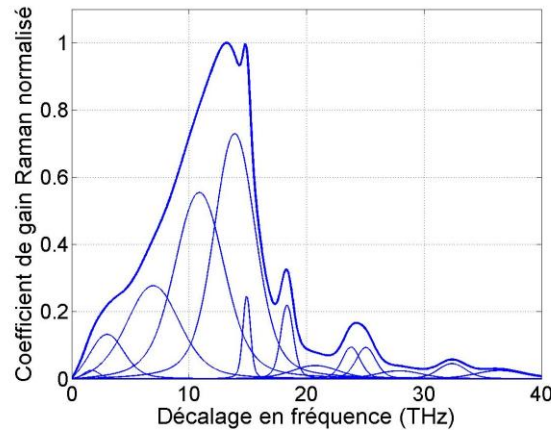


Figure 3.26 : Modélisation du coefficient de gain Raman et des treize composantes se superposant.

Ces données permettent de réaliser la courbe du gain Raman pour notre application. La Figure 3.27(a) ci-après présente le coefficient de gain Raman avec une longueur d'onde de pompe  $\lambda_p = 1480$  nm. Nous pouvons donc calculer le coefficient de gain Raman, dans le cadre de notre application, pour les données à 1550 nm et pour l'ASE, non négligeable (§ 3.2.1), autour de 1583,1 nm. Notre travail consiste ensuite à calculer le transfert de puissance réalisé de l'onde de puissance vers les données et l'ASE.

Par ailleurs, nous devons rappeler que chaque onde engendre de l'ASE, qui peut être plus ou moins importante selon la puissance de l'onde. De plus, nous savons que la diffusion Raman consiste en l'interaction entre une onde pompe et une onde signal ; la longueur d'onde de ce signal n'est pas forcément égale à la longueur d'onde Stokes. Dans ce cadre, nous devons considérer qu'il peut y avoir une interaction entre les données à 1550 nm, considérées alors comme une onde pompe, et l'onde autour de 1583,1 nm, considérée comme une onde signal. Dans ces conditions, nous supposons que de la puissance de l'onde de données peut être transférée vers l'onde existante autour de 1583,1 nm. Afin de calculer ce transfert d'énergie, nous devons donc également modéliser le coefficient de gain Raman dans le cas où  $\lambda_p = 1550$  nm. La Figure 3.27(b) présente le coefficient de gain Raman dans ce cas.

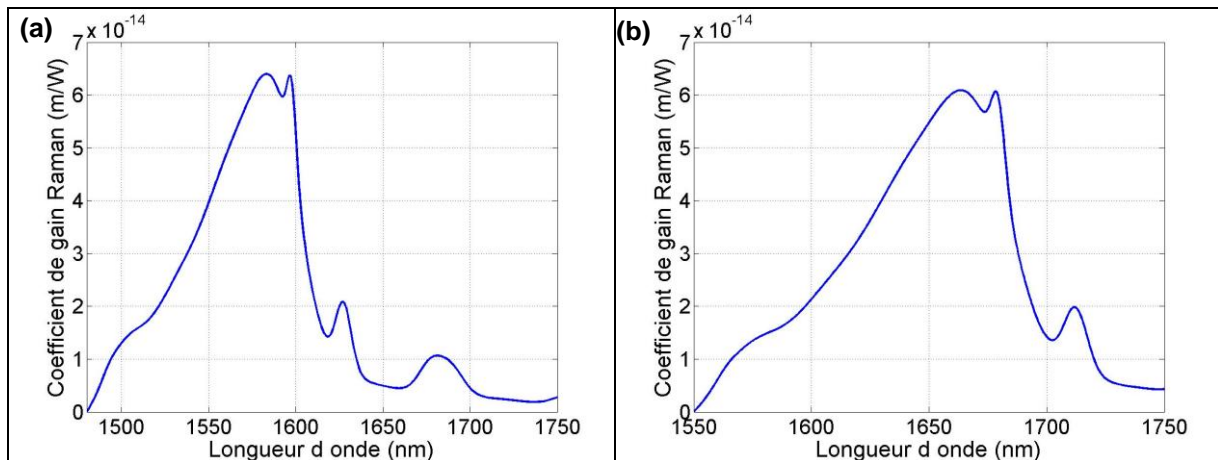


Figure 3.27 : Coefficient de Gain Raman en fonction de la longueur d'onde avec (a)  $\lambda_p = 1480$  nm et (b)  $\lambda_p = 1550$  nm.

Nous observons effectivement que ces deux spectres présentent des valeurs différentes, bien que l'allure soit similaire. Ainsi, dans le cas où la source pompe a une longueur d'onde égale à 1480 nm, le gain atteint une valeur maximum de  $6,40 \cdot 10^{-14} \text{ m.W}^{-1}$  à 1583,1 nm. Tandis que dans le cas où la source pompe a une longueur d'onde égale à 1550 nm, le gain a une valeur maximum de  $6,09 \cdot 10^{-14} \text{ m.W}^{-1}$  à 1663,5 nm.

Nous avons représenté le coefficient de gain Raman en fonction de la longueur d'onde, afin d'observer le coefficient de gain existant à une longueur d'onde, dite signal, différente de la longueur d'onde Stokes. D'après la Figure 3.27(a), le coefficient de gain Raman a une valeur de  $3,97 \cdot 10^{-14} \text{ m/W}$  à 1550 nm (avec  $\lambda_p = 1480 \text{ nm}$ ). Et d'après la Figure 3.27(b), le coefficient de gain Raman a une valeur de  $1,53 \cdot 10^{-14} \text{ m/W}$  à 1583,1 nm (avec  $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$ ). Ce terme n'est pas négligeable par la suite dans le cadre de notre application. L'amplification des données présentes à 1550 nm, observée lors de la caractérisation, est effective de par l'existence du gain Raman dû à la SLHP à 1480 nm.

La modélisation du coefficient de gain Raman, que nous avons effectuée, nous permet de modéliser l'incidence de la diffusion Raman sur les ondes se propageant dans la fibre optique.

### 3.5.1.b. La diffusion Raman

La diffusion Raman est un phénomène non-linéaire qui consiste en un couplage entre une onde pompe et une onde signal. L'onde pompe transfère de l'énergie vers l'onde signal, avec un gain qui dépend de l'écart fréquentiel optique entre les deux ondes. Nous avons établi précédemment le modèle du coefficient de gain Raman  $g_R$ . Lors de la transmission en régime statique de la puissance et des données, nous avons constaté que les données sont amplifiées à mesure que la puissance de la SLHP augmente. De plus, nous avons observé que l'ASE autour de 1583 nm, apparaît en sortie de la SLHP, et qu'elle est ensuite amplifiée lors de la propagation dans la fibre. Ce processus est visible en sortie de la SLHP lorsque sa puissance est supérieure ou égale à 33 dBm.

Pour expliquer les phénomènes que nous avons observés, nous devons modéliser l'évolution des puissances en tenant compte de :

- la diffusion Raman spontanée : la puissance de la pompe est transférée autour de la longueur d'onde Stokes, sans qu'il y existe de la puissance au préalable ;
- la diffusion Raman stimulée : de la puissance de la pompe est transférée vers une ou plusieurs ondes signal. Ce transfert dépend de l'énergie de l'onde pompe et de l'onde signal considérée, et du coefficient de gain Raman, lui-même dépendant de l'écart fréquentiel entre ces deux ondes.

Ces deux diffusions constituent le processus d'émission spontanée amplifiée : des photons sont générés par diffusion spontanée, et ceux-ci sont ensuite stimulés lors de la propagation.

Afin de modéliser l'évolution de la diffusion Raman pour un signal donné, nous employons les équations différentielles ci-après, couramment utilisées dans la littérature [Bromage 04, Chluda 06, Headley 05]. Elles décrivent l'évolution de la puissance de la pompe (noté  $P$ ) et d'un signal co- et/ou contra-propagatif (noté  $S$ ). La longueur d'onde du signal  $\lambda_S$  n'est pas forcément située à la longueur d'onde Stokes  $\lambda_{Stokes}$ . Elle est supérieure à la longueur d'onde de la pompe  $\lambda_P$ .

$$\frac{dP_P}{dz} = -\alpha_P P_P - \frac{\lambda_S}{\lambda_P} C_R(\lambda_P, \lambda_S) P_P P_S^\pm \quad (3.13)$$

$$\pm \frac{dP_S^\pm}{dz} = -\alpha_S P_S^\pm + C_R(\lambda_P, \lambda_S) P_P P_S^\pm + C_R(\lambda_P, \lambda_S) h \nu_S \nu_{Ref}(\lambda_S) [1 + N_{\Omega S}] P_P \quad (3.14)$$

avec :

- $P_P, P_S^+, P_S^-$  les puissances de la pompe, du signal co-propagatif (+) et du signal contra-propagatif (-) (W),  
 $z$  la position le long de la fibre optique (m),  
 $\alpha_P$  et  $\alpha_S$  les coefficients d'atténuation linéique de la fibre optique aux longueurs d'onde pompe et signal ( $m^{-1}$ ),  
 $\lambda_P$  et  $\lambda_S$  les longueurs d'ondes de la pompe et du signal (m),  
 $C_R(\lambda_X, \lambda_Y)$  l'efficacité de gain Raman de  $\lambda_X$  vers  $\lambda_Y$  ( $W^{-1}m^{-1}$ ),  
 $h$  la constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34} J.s$ ),  
 $\nu_S$  la fréquence optique de l'onde signal (Hz),  
 $\nu_{Ref}(\lambda_S)$  la largeur de bande spectrale sur laquelle nous calculons la puissance (Hz),  
 $N_{\Omega S}$  le facteur de population thermique de Bose-Einstein des phonons, avec :

$$N_{\Omega S} = \frac{1}{\exp\left(\frac{h\Omega_S}{k_B T}\right) - 1} \quad (3.15)$$

avec :

- $k_B$  la constante de Boltzmann ( $1,380 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$ ),  
 $\Omega_S$  l'écart de fréquence entre la pompe et le signal ( $\nu_P - \nu_S$ ) (Hz),  
 $T$  la température de la fibre optique (300 K).

Le premier terme  $\alpha_X P_X$  de chaque équation correspond à l'atténuation subie par les ondes lors de leur propagation dans la fibre optique.

Le second terme  $C_R(\lambda_X, \lambda_Y) P_X P_Y$  correspond à la diffusion Raman stimulée. Une part de la puissance à  $\lambda_X$  amplifie la puissance à  $\lambda_Y$ . Ce terme doit intervenir à la fois dans les équations de  $P_X$  et  $P_Y$  car la puissance transmise doit être retirée à  $P_X$  et ajoutée à  $P_Y$ . L'efficacité de gain Raman  $C_R$  est un paramètre proportionnel au coefficient de gain Raman  $g_R$ . Il définit le gain Raman en fonction de l'écart entre les longueurs d'ondes  $\lambda_X$  et  $\lambda_Y$ , mais aussi selon les conditions de propagation. Ce terme est décrit par :

$$C_R(\lambda_P, \lambda_S) = \frac{g_R(\lambda_P, \lambda_S)}{A_{eff} \cdot \kappa_R} \quad (3.16)$$

avec :

- $g_R$  le coefficient de gain Raman ( $m.W^{-1}$ ),  
 $A_{eff}$  l'aire effective de la fibre optique ( $m^2$ ),  
 $\kappa_R$  l'efficacité de polarisation.

Ce dernier terme  $\kappa_R$  varie en fonction de la polarisation de la pompe et du signal. Il vaut :

- 1, lorsque la polarisation de la pompe est colinéaire à celle du signal,
- 2, lorsque la pompe est dépolarisée,
- $\infty$ , lorsque les polarisations de la pompe et du signal sont orthogonales.



Dans notre cas, nous n'imposons pas la polarisation de la pompe. Nous avons constaté par mesure que la source laser est dépolarisée. Nous prendrons donc  $\kappa_R = 2$ .

L'aire effective du cœur de la fibre  $A_{eff}$  indique le degré de non-linéarité de la fibre optique. Il dépend des distributions d'intensité de la pompe et du signal, respectivement  $I_P$  et  $I_S$  [Headley 05] :

$$A_{eff} = \frac{(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_P(x, y, z) dx dy)(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_S(x, y, z) dx dy)}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_P(x, y, z) I_S(x, y, z) dx dy} \quad (3.17)$$

Afin de simplifier l'équation (3.17), nous considérons que l'amplitude du profil de champ de mode  $F$  de la pompe et du signal sont identiques, soit :

$$I_P(x, y, z) = I_S(x, y, z) = |F(x, y)|^2 \quad (3.18)$$

Et nous obtenons :

$$A_{eff} = \frac{(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^2 dx dy)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^4 dx dy} \quad (3.19)$$

Enfin, le profil de champ de mode est assimilé à une fonction gaussienne :  $F(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/\omega_r^2]$ , avec  $\omega_r$  le rayon du champ de mode. D'après cette équation, l'aire effective se résume à [Headley 05] :

$$A_{eff} \approx \pi \omega_r^2 \quad (3.20)$$

En résumé, l'aire effective ne dépend que d'une caractéristique physique de la fibre. Dans le cas de notre fibre optique monomode SMF-28, nous obtenons :  $A_{eff} = 80 \mu m^2$ .

Enfin, le dernier terme apparaissant dans l'équation (3.14) de propagation du signal correspond à la diffusion Raman spontanée. En effet, une part de la puissance pompe génère de la puissance à la longueur d'onde  $\lambda_s$  par diffusion spontanée. Cette diffusion est elle-même amplifiée lors de la propagation : il s'agit du processus d'ASE. D'ailleurs, l'équation (3.14) est habituellement utilisée pour modéliser l'évolution de la puissance de l'ASE. Nous nous en servons pour le cas général afin de prendre en compte tous les phénomènes.

Dans le cadre de notre application, nous devons tenir compte de deux ondes signal : les données à 1550 nm et l'ASE autour de 1583,1 nm. Donc, nous devons considérer la diffusion Raman stimulée de 1480 nm vers 1550 nm et autour de 1583 nm. De plus, nous avons montré que le coefficient de gain Raman n'est pas négligeable dans le cas de l'interaction entre l'onde portant les données et l'ASE autour de 1583 nm. Nous devons donc utiliser ces équations avec 1550 nm comme pompe et 1583 nm comme signal.

Nous avons défini les équations de propagation dans le cadre de la diffusion Raman. Nous continuons ensuite en abordant la propagation dans le cadre de la diffusion Brillouin.

### 3.5.2. La diffusion Brillouin

Nous nous intéressons à présent à la diffusion Brillouin dans la fibre optique. Ce phénomène est considéré comme étant plus dominant que la diffusion Raman [Stolen 08]. La

diffusion Brillouin est souvent abordée dans le cadre de l'amplification Raman car elle provoque une saturation du gain, due à la déplétion de la pompe [Foley 89]. De plus, elle engendre un retour important d'énergie. Bien que nous ayons montré ce phénomène comme négligeable dans le cadre de notre dispositif (§ 2.1.3.b), nous souhaitons tout de même le prendre en compte étant donné les puissances mises en jeu. En effet, ce phénomène nous oblige habituellement à limiter la puissance appliquée en entrée de la fibre à quelques centaines de milliwatts [Miyakawa 04]. Or, notre application exige de transmettre quelques watts en entrée. De plus, les données étant amplifiées par diffusion Raman stimulée, la puissance de ces dernières risque d'être supérieure à la puissance seuil calculée dans le chapitre 2 (§ 2.1.3.b). Nous préférons donc prendre en compte ce phénomène pour obtenir un modèle plus complet.

Dans le cas d'une fibre optique monomode, la diffusion Brillouin engendre une onde Stokes dont la direction est contraire à celle de l'onde pompe. Le spectre de gain Brillouin présente une valeur maximale pour un décalage en fréquence de 11 GHz par rapport à la fréquence de la pompe (soit inférieure à 0,1 nm dans notre application), avec une largeur à mi-hauteur de 20 MHz. Le gain dépend de la largeur de bande de la source pompe par rapport à la largeur du spectre du gain Brillouin.

Afin de décrire l'évolution de la diffusion Brillouin stimulée (SBS : Stimulated Brillouin Scattering), nous avons choisi le modèle distribué établi par R.W. Boyd. [Boyd 90]. L'équation d'évolution ressemble à celle de la diffusion Raman [Foley 89, A.B. Ruffin 04, Kobayakov 10] :

$$\frac{dP_P}{dz} = -\alpha_P P_P - \frac{\lambda_B}{\lambda_P} C_{SBS,P} P_P P_B^- \quad (3.21)$$

$$-\frac{dP_{P,SBS}^-}{dz} = -\alpha_B P_{P,SBS}^- + C_{SBS,P} P_P P_{P,SBS}^- + C_{SBS,P} P_P h\nu_B \nu_{Ref,SBS}(\lambda_B) [1 + N_{QSBS}] \quad (3.22)$$

L'équation (3.21) correspond à l'évolution de l'onde pompe. Tandis que l'équation (3.22) correspond à l'évolution de la puissance de l'onde Stokes due à la diffusion Brillouin. Le premier terme est l'atténuation de la fibre. Le second terme correspond à l'action de la diffusion Brillouin stimulée. Le dernier terme de l'équation (3.22) correspond à la diffusion Brillouin spontanée. Avec :

$P_P$  et  $P_{P,SBS}$  les puissances de la pompe et de l'onde Stokes due à la diffusion Brillouin (W),  
 $z$  la position le long de la fibre optique (m),  
 $\alpha_P$  et  $\alpha_B$  les coefficients d'atténuation de la fibre optique aux longueurs d'ondes pompe et Stokes ( $m^{-1}$ ),  
 $\lambda_B$  la longueur d'onde de l'onde Stokes due à la diffusion Brillouin (m),  
 $C_{SBS,P}$  l'efficacité de gain Brillouin ( $W^{-1}m^{-1}$ ), avec :

$$C_{SBS,P} = \frac{g_{SBS}}{A_{eff} \kappa_{SBS} Y_{SBS}} \quad (3.23)$$

avec :

$g_{SBS}$  le coefficient de gain Brillouin ( $m.W^{-1}$ ), avec  $g_{SBS} = 1,68.10^{-11} m.W^{-1}$  à 1550 nm dans le cas d'une fibre optique SMF-28 [Lanticq 08],  
 $A_{eff}$  l'aire effective de la fibre optique ( $m^2$ ),  
 $\kappa_{SBS}$  facteur de polarisation, dont la valeur est comprise entre 1 (polarisations identiques des deux ondes) et 2 (polarisations orthogonales), et égal à 3/2 dans le cas d'une fibre monomode pour des ondes dépolarisées,

$Y_{SBS} = (1 - \omega_P / \omega_{SBS})$  la constante liée à la largeur de bande  $\omega_P$  du laser à  $\lambda_P$  en fonction de la largeur de bande Brillouin  $\omega_{SBS} = 20$  MHz,  
 $h$  la constante de Planck,  
 $\nu_B$  la fréquence optique de l'onde Stokes (Hz),  
 $\nu_{Ref,SBS}(\lambda_B)$  la largeur de bande spectrale de l'onde Stokes (Hz),  
 $N_{\Omega_{SBS}}$  le facteur de population thermique de Bose-Einstein des phonons, avec :  

$$N_{\Omega_{SBS}} = \frac{1}{\exp([\frac{h\Omega_{SBS}}{k_B T}] - 1)}$$
 (3.24)  
 avec :  
 $k_B$  la constante de Boltzmann ( $1,380\,662 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ ),  
 $\Omega_{SBS}$  l'écart de fréquence entre la pompe et l'onde Stokes ( $\nu_P - \nu_B = 11$  GHz) (Hz),  
 $T$  la température de la fibre optique (300 K).

L'analyseur de spectre optique utilisé dans nos manipulations a une résolution de 0,1 nm, supérieure à l'écart existant entre l'onde pompe et l'onde Stokes. Nous ne pouvons donc pas distinguer l'onde générée par diffusion Brillouin. Afin de modéliser cette diffusion, nous avons supposé que :  $\lambda_P = \lambda_B$ . Ensuite, il est nécessaire de connaître la valeur initiale de la puissance de l'onde Stokes. Nous ne sommes pas en mesure de connaître cette valeur. Nous avons défini que la valeur initiale de la puissance de l'onde Stokes est égale à 1 nW. Cette valeur est couramment utilisée dans la littérature [Kobyakov 10].

Les équations (3.21) et (3.22) serviront pour chaque onde se propageant dans la fibre : la puissance, les données co- et /ou contra-propagatives, et l'ASE autour de 1583 nm. Il reste à présent à aborder un phénomène qui est considéré comme une source de bruit : la double rétrodiffusion Rayleigh.

### 3.5.3. La double rétrodiffusion Rayleigh

Une onde se propageant dans la fibre subit inévitablement des réflexions. Toutes les précautions prises pour éviter des réflexions localisées dans le dispositif ne permettent pas d'éliminer toutes les réflexions. En effet, la diffusion Rayleigh engendre des réflexions distribuées le long de la fibre. Nous rappelons que nous avons vu que la diffusion Rayleigh est produite par les non-uniformités de l'indice de réfraction le long de la fibre optique (§ 2.1.3.a). Ces réflexions, combinées avec la diffusion Raman engendrent une source du bruit supplémentaire [Bromage 04, Chluda 06]. Pour bien comprendre le phénomène, nous l'avons schématisé sur la Figure 3.28.

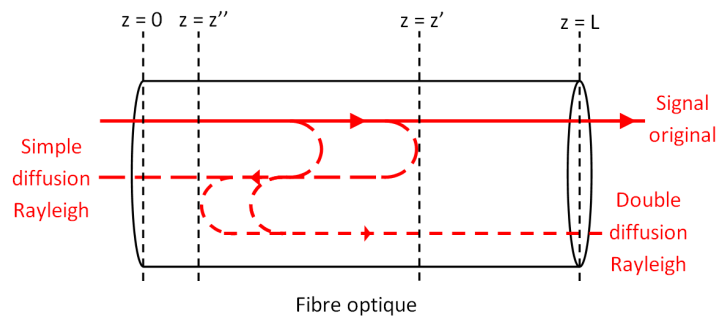


Figure 3.28 : Schéma simplifié du phénomène de double rétrodiffusion Rayleigh [Parolari 08].

Dans un premier temps, une partie de l'onde est rétrodiffusée par diffusion Rayleigh. L'onde obtenue par rétrodiffusion Rayleigh simple (SRB : Simple Rayleigh Backscattering) se propage et est amplifiée par diffusion Raman stimulée. Or, cette onde subit également des pertes par rétrodiffusion Rayleigh et crée ainsi une onde co-propagative au signal original. Cette onde obtenue par double rétrodiffusion Rayleigh (DRB : Double Rayleigh Backscattering) est également amplifiée par diffusion Raman stimulée. De même que l'onde SRB vis-à-vis de l'onde originale, l'onde DRB est la somme des parts rétrodiffusées de l'onde SRB et amplifiées lors de la propagation. Ce phénomène est aussi appelé interférences à trajets multiples (MPI : Multiple Path Interference), créant ainsi du bruit qui se superpose à l'onde originale [Parolari 03].

Nous pouvons modéliser les MPI en utilisant l'équation d'évolution de l'onde originale, de l'onde SRB et de l'onde DRB [Bromage 04] en tenant compte de la diffusion Raman stimulée :

$$\frac{dP_S}{dz} = -\alpha_S P_S + C_R(\lambda_P, \lambda_S) P_P P_S \quad (3.25)$$

$$-\frac{dP_{S,SRB}^-}{dz} = -\alpha_S P_{S,SRB}^- + C_R(\lambda_P, \lambda_S) P_P P_{S,SRB}^- + \alpha_{RS} P_S \quad (3.26)$$

$$\frac{dP_{S,DRB}}{dz} = -\alpha_S P_{S,DRB} + C_R(\lambda_P, \lambda_S) P_P P_{S,DRB} + \alpha_{RS} P_{S,SRB}^- \quad (3.27)$$

avec :

$P_P, P_S$	la puissance de la pompe et la puissance du signal original (W),
$P_{S,SRB}^-, P_{S,DRB}$	la puissance obtenue par rétrodiffusion Rayleigh simple et la puissance obtenue par double rétrodiffusion Rayleigh (W),
$\alpha_{RS}$	le coefficient de pertes dû à la diffusion Rayleigh ( $m^{-1}$ ).

Le coefficient de pertes dû à la diffusion Rayleigh prend généralement une valeur comprise entre  $0,6.10^{-4}$  et  $1.10^{-4} \text{ km}^{-1}$ , pour des fibres optiques ayant une aire effective respectivement comprise entre 80 et  $55 \mu\text{m}^2$  [Bromage 04]. Étant donné que l'onde se propage dans une fibre optique SMF, ayant une aire effective de  $80 \mu\text{m}^2$ , nous utiliserons  $\alpha_{RS} = 0,6.10^{-4} \text{ km}^{-1}$ .

Pour chaque équation, le premier terme correspond à l'atténuation de l'onde dans la fibre et le second correspond à la diffusion Raman stimulée due à une onde pompe (notée  $P_P$ ). Le dernier terme correspond à la perte d'énergie obtenue par rétrodiffusion Rayleigh à chaque portion de fibre, produisant ainsi l'onde Rayleigh rétrodiffusée respective.

Dans le cas de notre dispositif, nous appliquerons ces équations pour l'onde de données à 1550 nm et pour l'ASE autour de 1583 nm. Étant donné le grand niveau de puissance émis par la SLHP, nous supposons que la part diffusée ne sera pas négligeable. Nous souhaitons donc prendre en compte ce phénomène pour la puissance à 1480 nm. Dans ce cas, nous pouvons utiliser les équations (3.25), (3.26) et (3.27), en retirant évidemment le terme correspondant à l'amplification Raman ( $C_R P_P P_S$ )

Nous prendrons en compte ces termes supplémentaires pour chaque onde se propageant dans la fibre : la puissance, les données co- et/ou contra-propagatives, et l'onde Stokes. Nous

pouvons à présent rassembler tous les éléments développés ci-avant pour écrire les équations d'évolutions relatives à chaque onde et intégrant tous les phénomènes.

### 3.5.4. Équations d'évolutions

La modélisation de la propagation des ondes dans la fibre optique doit finalement comprendre l'ensemble des phénomènes présentés précédemment : la diffusion Raman, la diffusion Brillouin et la double rétrodiffusion Rayleigh. Nous traitons l'évolution des trois ondes relevées lors de nos caractérisations : la puissance à 1480 nm, noté ici  $\lambda_P$ , les données co- et/ou contra-propagatives à 1550 nm, noté  $\lambda_D$ , et l'ASE autour de 1583,1 nm, noté  $\lambda_A$ . Les ondes générées par diffusion Brillouin ou par simple rétrodiffusion Rayleigh se propageant de façon contraire, nous établissons donc une équation d'évolution commune comprenant ces deux phénomènes, que nous devons écrire pour chaque onde. De même, les ondes générées par double rétrodiffusion Rayleigh se propageant dans le même sens que l'onde originale, nous choisissons d'ajouter ce bruit dans l'équation d'évolution de l'onde originale.

Les équations d'évolutions complètes, données ci-après, sont essentiellement constituées à partir des références suivantes : [Agrawal 02], [Boyd 90], [Bromage 04], [Chluda 06], [Foley 89] et [Headley 05].

$$\frac{dP_P}{dz} = \underbrace{-\alpha_P P_P}_{\text{atténuation}} - \underbrace{\frac{\lambda_D}{\lambda_P} C_R(\lambda_P, \lambda_D) P_P P_D^\pm}_{\text{déplétion Raman vers les données}} - \underbrace{\frac{\lambda_A}{\lambda_P} C_R(\lambda_P, \lambda_A) P_P P_A}_{\text{déplétion Raman vers l'ASE}} - \underbrace{C_{SBS} P_P P_{P,Retro}^-}_{\text{déplétion Brillouin}} + \underbrace{\alpha_{RS} P_{P,Retro}^-}_{\text{DRB}} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_D^\pm}{dz} = & \underbrace{-\alpha_D P_D^\pm}_{\text{atténuation}} + \underbrace{C_R(\lambda_P, \lambda_D) P_P P_D^\pm}_{\text{amplification Raman de la SLHP}} + \underbrace{C_R(\lambda_P, \lambda_D) h\nu_D \nu_{Ref}(\lambda_D) [I + N_{\Omega D}] P_P}_{\text{diffusion Raman spontanée de la SLHP}} \\ & - \underbrace{\frac{\lambda_A}{\lambda_D} C_R(\lambda_D, \lambda_A) P_D^\pm P_A}_{\text{déplétion Raman vers l'ASE}} - \underbrace{C_{SBS} P_D^\pm P_{D,Retro}^\mp}_{\text{déplétion Brillouin}} + \underbrace{\alpha_{RS} P_{D,Retro}^\mp}_{\text{DRB}} \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_A}{dz} = & \underbrace{-\alpha_A P_A}_{\text{atténuation}} + \underbrace{C_R(\lambda_P, \lambda_A) P_P P_A}_{\text{amplification Raman de la SLHP}} + \underbrace{C_R(\lambda_P, \lambda_A) h\nu_A \nu_{Ref}(\lambda_A) [I + N_{\Omega A}] P_P}_{\text{diffusion Raman spontanée de la SLHP}} \\ & + \underbrace{C_R(\lambda_D, \lambda_A) (P_D^\pm + P_{D,Retro}^\mp) P_A}_{\text{amplification Raman des données}} - \underbrace{C_{SBS} P_A P_{A,Retro}^-}_{\text{déplétion Brillouin}} + \underbrace{\alpha_{RS} P_{A,Retro}^-}_{\text{DRB}} \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{P,Retro}^-}{dz} = & \underbrace{-\alpha_P P_{P,Retro}^-}_{\text{atténuation}} + \underbrace{C_{SBS} P_P P_{P,Retro}^-}_{\text{SBS}} + \underbrace{C_{SBS,p} h\nu_P \nu_{Ref,SBS}(\lambda_P) [I + N_{\Omega SBS}] P_P}_{\text{diffusion Brillouin spontanée}} \\ & + \underbrace{\alpha_{RS} P_P}_{\text{SRB}} \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned}
\mp \frac{dP_{D,Retro}^{\mp}}{dz} = & \underbrace{-\alpha_D P_{D,Retro}^{\mp}}_{\text{atténuation}} + \underbrace{C_R(\lambda_P, \lambda_D) P_P (P_{D,Retro}^{\mp} + h\nu_D \nu_{RefD}(\lambda_D) [I + N_{\Omega D}])}_{\text{amplification Raman et diffusion Raman spontanée de la SLHP}} \\
& - \underbrace{\frac{\lambda_A}{\lambda_D} C_R(\lambda_D, \lambda_A) P_{D,Retro}^{\mp} P_A}_{\text{déplétion Raman vers l'ASE}} \\
& + \underbrace{C_{SBS D} P_D^{\pm} (P_{D,Retro}^{\mp} + h\nu_D \nu_{Ref,SBS}(\lambda_D) [I + N_{\Omega SBS}])}_{\text{SBS et diffusion Brillouin spontanée}} + \underbrace{\alpha_{RS} P_D}_{\text{SRB}}
\end{aligned} \tag{3.32}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dP_{A,Retro}^{\mp}}{dz} = & \underbrace{-\alpha_A P_{A,Retro}^{\mp}}_{\text{atténuation}} + \underbrace{C_R(\lambda_P, \lambda_A) P_P (P_{A,Retro}^{\mp} + h\nu_A \nu_{RefA}(\lambda_A) [I + N_{\Omega A}])}_{\text{amplification Raman et diffusion Raman spontanée de la SLHP}} \\
& + \underbrace{C_{SBS A} P_A (P_{A,Retro}^{\mp} + h\nu_A \nu_{Ref,SBS}(\lambda_A) [I + N_{\Omega SBS}])}_{\text{SBS et diffusion Brillouin spontanée}} + \underbrace{\alpha_{RS} P_A}_{\text{SRB}}
\end{aligned} \tag{3.33}$$

avec :

- $P_P, P_D^{\pm}, P_A$  les puissances de la pompe, du signal en co(+) et contra propagatif(-), et de l'ASE (W),
- $P_{P,Retro}^{\mp}, P_{D,Retro}^{\mp}, P_{A,Retro}^{\mp}$  les puissances rétrodiffusées de la pompe, du signal en co(-) et contra propagatif(+), et de l'ASE (W),
- $z$  la position le long de la fibre optique (m),
- $\lambda_P, \lambda_D, \lambda_A$  les longueurs d'ondes de la pompe, du signal en co(+) et contra propagatif(-), et de l'ASE (m),
- $\alpha_P, \alpha_D, \alpha_A$  les coefficients d'atténuation de la fibre aux longueurs d'ondes de la pompe, du signal en co(+) et contra propagatif(-), et de l'ASE ( $m^{-1}$ ),
- $\nu_P, \nu_D, \nu_A$  les fréquences optiques du signal en co(+) et contra propagatif(-), et de l'onde Stokes (Hz),
- $N_{\Omega D}, N_{\Omega A}$  le facteur d'occupation des phonons à la longueur d'onde du signal en co(+) et contra propagatif(-), et de l'ASE.

Les autres facteurs ont déjà été détaillés lors de l'étude des différents phénomènes.

Nous avons décrit dans les équations précédentes les phénomènes existants lors de la propagation dans la fibre : l'atténuation de celle-ci, la diffusion Raman, la diffusion Brillouin et la double rétrodiffusion Rayleigh. Nous avons constaté lors de la caractérisation que la puissance de la SLHP subit une déplétion, c'est-à-dire que cette puissance subit des pertes supplémentaires autres que celle due à l'atténuation. Nous supposons que cette déplétion est due à la diffusion Raman et à la diffusion Brillouin. En conséquence, nous ne pouvons pas simplifier ces équations d'évolution pour notre étude, comme c'est le cas en général dans la bibliographie. En effet, la déplétion de la puissance à 1480 nm ne s'explique pas uniquement par l'atténuation de la fibre. Nous devons tenir compte des pertes engendrées par le transfert de puissance occasionné dans le cas de la diffusion Raman. La diffusion Brillouin est également un facteur essentiel car ce phénomène cause aussi une déplétion de la pompe, et donc la saturation du gain Raman. Enfin, nous avons ajouté la double rétrodiffusion Rayleigh, qui est une cause de bruit dans les systèmes à amplification Raman. Les équations étant

complexes, nous avons employé une résolution numérique pour parvenir aux résultats que nous présentons dans la suite.

Les simulations que nous avons réalisées sont effectuées avec un pas  $dz = 1$  m, pour une longueur de fibre  $L_Z = 10$  km. Nous avons uniquement étudié l'évolution des puissances lors de leur propagation dans la fibre, c'est-à-dire entre les coupleurs (Figure 3.1). Nous avons pris pour conditions initiales les puissances en entrée de la fibre, mesurées à l'aide des coupleurs, au point  $C_{1D}$  (Figure 3.1) pour les ondes descendantes, et au point  $C_{2M}$  (Figure 3.1) pour les ondes montantes. Les largeurs de bande spectrales pour les ondes à 1550 nm et 1583,1 nm sont respectivement fixées à 0,1 nm et 40 nm. La largeur de bande spectrale à 1480 nm évolue entre 0,4 nm et 0,8 nm selon la puissance de la SLHP. Il s'agit des largeurs relevées lors des mesures expérimentales.

### 3.6. Mise en application du modèle

Lors de la constitution du modèle, nous avons décidé de tenir compte de plusieurs phénomènes rencontrés par les ondes se propageant dans la fibre optique. Dans un premier temps, nous présentons les résultats obtenus par simulation avec notre modèle réalisé sous Matlab, afin de les comparer à nos résultats expérimentaux. Puis dans un second temps, nous identifions quantitativement la contribution de chaque phénomène physique mis en jeu.

#### 3.6.1. Comparaison des résultats de modélisation aux résultats expérimentaux

Avant de tirer profit de notre modèle, nous commençons par le valider en confrontant les résultats théoriques qu'il fournit en sortie d'une fibre longue de 10 km, avec les mesures de puissances réalisées au point  $F_D$  (mesures au point  $C_{2D}$  corrigées par le coefficient de couplage du coupleur (2), Figure 3.1), pour les ondes descendantes, et au point  $F_M$  (mesures au point  $C_{1M}$  corrigées par le coefficient de couplage du coupleur (1), Figure 3.1), pour les ondes montantes, et cela en fonction de la puissance de la SLHP. Il est à noter que la puissance relevée autour de 1583 nm se situe au niveau du bruit du détecteur lorsque la puissance de la SLHP est inférieure à 34 dBm. Dans ce cas, nous avons choisi de neutraliser ce terme dans les équations et donc de ne prendre en compte que l'atténuation de la fibre dans les équations régissant l'évolution de l'ASE autour de 1583 nm.

La Figure 3.29(a) présente les résultats dans le cadre de la transmission de la puissance, sans la présence de données. La Figure 3.29(b) correspond à la superposition de la puissance et des données co-propagatives, avec  $P_{\text{Données (Ad)}} = 0$  dBm. La Figure 3.29(c) correspond à la superposition de la puissance et des données contra-propagatives, avec  $P_{\text{Données (AM)}} = 0$  dBm. La Figure 3.29(d) correspond à la superposition de la puissance, des données co-propagatives et des données contra-propagatives, avec  $P_{\text{Données (Ad)}} = 0$  dBm et  $P_{\text{Données (AM)}} = -3$  dBm. Nous retrouvons sur les figures les puissances suivantes :

- la puissance de la SLHP ( $1480 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ ) ;
- la puissance des données ( $1549,5 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$  pour les données descendantes, et  $1551 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$  pour les données montantes);
- la puissance de l'ASE ( $1583 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ ).

Dans chaque cas, le trait plein correspond aux résultats expérimentaux et le trait en pointillés correspond à la simulation. Nous notons dans la suite que la longueur d'onde des données est à 1550 nm.



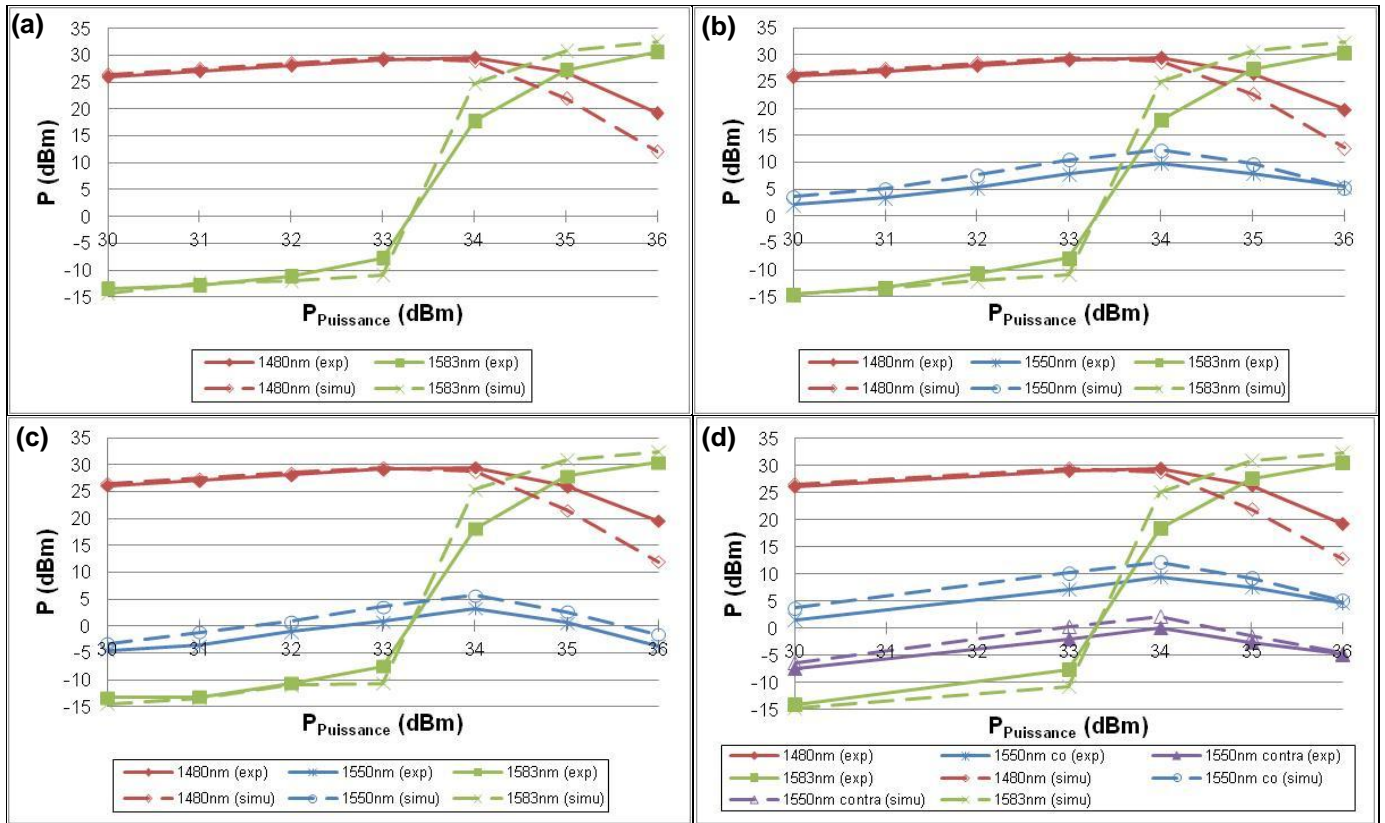


Figure 3.29 : Résultats de la simulation et de la caractérisation expérimentale, de la puissance en sortie de la fibre optique à différentes longueurs d'ondes pour les cas suivants : (a) transmission de la SLHP uniquement, (b) superposition de la puissance et des données descendantes, (c) superposition de la puissance et des données montantes, (d) superposition de la puissance et des données descendantes et montantes.

Les résultats obtenus par simulation suivent correctement l'évolution de ceux relevés expérimentalement. Les données co- ou contra-propagatives sont bien amplifiées lorsque la puissance de la SHLP est comprise entre 17 dBm et 34 dBm. Puis, comme nous l'avons constaté par mesure, le niveau de puissance diminue. En effet, la diffusion Raman stimulée de 1480 nm vers 1550 nm devient moins performante comme nous l'avons expliqué précédemment. De plus, nous constatons que l'ASE autour de 1583 nm prend de l'ampleur dès lors que la puissance de la SHLP est supérieure à 33 dBm, en raison du transfert de puissance vers cette bande spectrale par diffusion Raman stimulée.

Néanmoins, il existe quelques différences car nous observons que la puissance des données, dans le cadre du modèle, est supérieure d'environ 2 dB à celle des données relevées expérimentalement. Lorsque la puissance de la SLHP est supérieure à 33 dBm, nous observons que la puissance à 1480 nm décroît plus rapidement que prévu, et aussi que la puissance de l'ASE obtenue avec le modèle est supérieure à celle mesurée. Ces divergences qualitatives peuvent être corrigées numériquement si nous modifions le gain Raman. Nous rappelons que ce gain avait été estimé, car il n'est pas mesurable dans notre cas. Pour obtenir un très bon accord entre mesure et simulation, le gain  $g_R$  doit être fixé à 84% du précédent gain Raman calculé.

Le modèle théorique que nous proposons est une première approche qui valide le comportement de l'évolution des puissances observées expérimentalement. L'objectif est ici d'expliquer par cette modélisation l'origine des différents transferts de puissance. Dans la suite, nous allons nous appuyer sur ce modèle pour identifier la contribution de chaque phénomène dans l'évolution de la puissance des ondes.

### 3.6.2. Évolution des phénomènes optiques

Dans ce paragraphe, nous présentons pour chaque onde, selon la configuration de superposition de la puissance et des données, la contribution de chacun des phénomènes décrits lors de la mise en équation de l'évolution des puissances des ondes. Parmi ces phénomènes à considérer, certains seront toujours présents :

- l'atténuation de la fibre optique,
- la diffusion Brillouin spontanée et stimulée,
- la double rétrodiffusion Rayleigh.

Ensuite, la diffusion Raman stimulée est considérée soit comme une perte s'il s'agit d'un transfert, soit comme un gain s'il s'agit d'une amplification. Enfin, il faut prendre en compte la diffusion Raman spontanée provenant de la SLHP à 1480 nm, et engendrant de l'ASE autour de 1583 nm.

Jusque là, nous avons toujours étudié les quatre cas de propagation de la puissance et des données, à savoir :

- la transmission de la puissance ;
- la superposition de la puissance et des données descendantes ;
- la superposition de la puissance et des données montantes ;
- la superposition de la puissance et des données descendantes et montantes.

Nous avons constaté que la puissance des ondes évolue de façon identique, quel que soit le cas de transmission choisi. Nous en déduisons que l'étude du dernier cas de transmission, complet, est suffisante pour suivre l'évolution de la contribution des phénomènes.

Nous représentons la contribution de chaque phénomène au travers du calcul du bilan de liaison optique. Ce bilan de liaison est calculé lors de la simulation, en isolant chaque phénomène des équations d'évolution des puissances (équations (3.28) à (3.33)). Pour une puissance donnée de la SLHP, la somme des bilans de liaison des phénomènes, additionnés à la puissance de l'onde mesurée en entrée de la fibre optique, correspond aux résultats de la Figure 3.29.

Nous présentons sur la Figure 3.30, le bilan de liaison de chacun des phénomènes en fonction de la puissance émise par la SLHP, dans le cas de la superposition de la puissance et des données descendantes et montantes. Nous avons choisi de ne pas représenter la contribution de puissance due uniquement à la diffusion Raman spontanée lors de la propagation dans la fibre, car ce phénomène est négligeable d'après nos résultats.

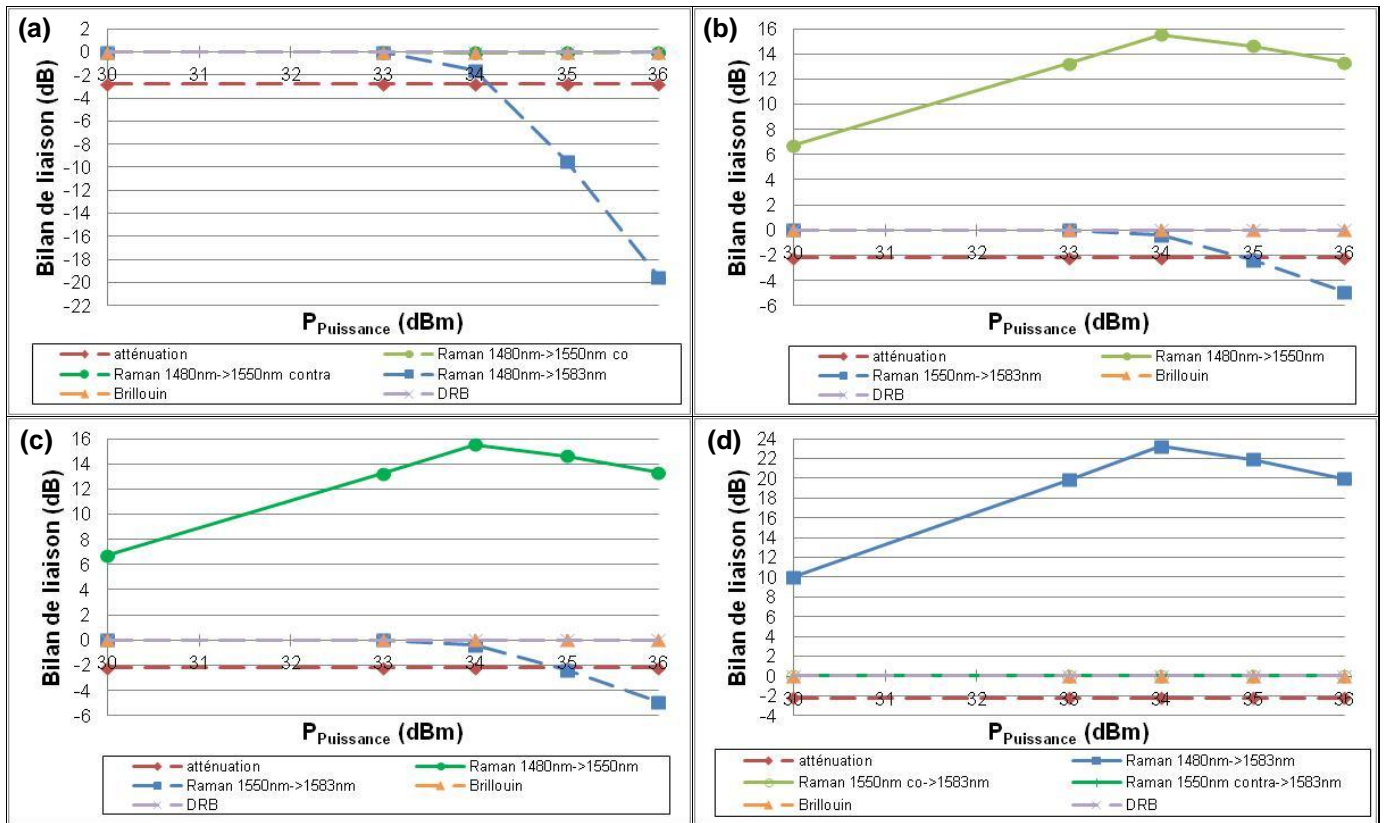


Figure 3.30 : Évolution de la contribution de chaque phénomène, sous la forme d'un bilan de liaison, en fonction de la puissance de la SLHP sur : (a) la puissance à 1480 nm, (b) les données descendantes à 1550 nm, (c) les données montantes à 1550 nm et (d) l'ASE autour de 1583 nm.

Tout d'abord, l'atténuation de la fibre est considérée comme un phénomène linéaire. Elle reste donc constante quelle que soit la puissance employée (-2,8 dB à 1480 nm, et -2,2 dB à 1550 nm et à 1583 nm). Ensuite, nous observons que la double rétrodiffusion Rayleigh est négligeable pour toutes les ondes.

Nous nous intéressons à présent à la diffusion Raman stimulée. Nous rappelons que ce phénomène est modélisé par un couplage entre la puissance pompe et la puissance du signal à considérer.

Dans le cas du transfert entre la puissance et les données, nous observons que le phénomène est négligeable pour la puissance. En effet, le niveau de puissance des données est faible par rapport à celui de la puissance à 1480 nm. Ensuite, et comme nous nous y attendions, la diffusion Raman, due à la puissance, amplifie les données avec un bilan de liaison maximum de 15,5 dB lorsque la SLHP émet 34 dBm. Nous constatons qu'il s'agit du phénomène ayant la contribution la plus importante. Le gain diminue à partir de 35 dBm car la puissance de la SLHP à 1480 nm est décalée vers l'ASE.

En effet, dans le cas du transfert de puissance de 1480 nm vers l'ASE autour de 1583 nm, nous observons que l'onde de puissance subit une perte importante, le bilan de liaison atteignant -19,6 dB lorsque la SLHP émet 36 dBm. Cela explique effectivement la déplétion de la puissance à 1480 nm. La puissance transférée après diffusion Raman engendre un gain important de l'ASE comme attendu, avec un maximum pour le bilan de liaison de 23,4 dB lorsque la SLHP émet 34 dBm. Ce gain diminue ensuite comme dans le cas des données.

Par ailleurs, nous rappelons avoir souhaité étudier le transfert d'énergie par la diffusion Raman entre les données à 1550 nm et l'ASE autour de 1583 nm (§ 3.5.1.a). Nous avons calculé le coefficient de gain Raman dans le cas d'une pompe à 1550 nm et nous avons vu

que, bien qu'il soit faible autour de 1583 nm, il n'est cependant pas négligeable (Figure 3.27). Nous observons dans le cas de la ASE (Figure 3.30(d)) que sa contribution est relativement très faible. Par contre, l'impact de ce transfert sur les données à 1550 nm est assez conséquent (Figure 3.30(b) et Figure 3.30(c)). En conséquence une part de la puissance des données est donc transférée vers l'ASE au détriment de leur propre puissance, avec un bilan de liaison maximum de -4,9 dB lorsque la SLHP émet 36 dBm. Dans une première version du modèle, ce terme de transfert n'était pas pris en compte et les résultats de la simulation ne correspondaient pas à ceux de notre caractérisation. Nos calculs n'expliquaient pas entièrement la saturation de la puissance des données. Nous notons à présent qu'il est nécessaire de rajouter ce terme de transfert pour faire correspondre nos résultats.

Ensuite, nous constatons que la diffusion Brillouin est négligeable, quelle que soit l'onde considérée. Cela conforte nos affirmations du chapitre 2 (§ 2.1.3.b) ; c'est-à-dire que l'onde de puissance et l'ASE ont une largeur de raie à mi-hauteur trop grande par rapport à celle du gain Brillouin, et que celui-ci est négligeable dans notre application. De plus, les données ne subissent pas de pertes par ce phénomène car leur puissance est inférieure à la puissance du seuil d'apparition. Notons que si la largeur de bande spectrale à 1480 nm était plus fine (inférieure à 0,01 nm, soit inférieure au GHz), ce phénomène serait plus important et nous empêcherait de transmettre correctement la puissance. Il s'agit du problème récurrent posé dans le cadre de l'opto-alimentation pour les longues distances [Miyakawa 04]. En étant peu exigeant sur la finesse spectrale de l'onde transportant la puissance, nous gagnons finalement en puissance transmise.

Pour résumer, après avoir observé le bon accord entre nos mesures et les simulations, nous avons cherché à partir du modèle théorique, à mettre en évidence la contribution de chacun des phénomènes physiques. Ces dernières simulations ont permis de mieux comprendre les évolutions des différents signaux en fonction de la puissance de la SLHP et de séparer leur effet respectif. Nous avons constaté que la diffusion Raman stimulée est le phénomène le plus important existant lors de la propagation. Il crée ainsi un transfert de la puissance à 1480 nm vers les données à 1550 nm, montantes ou descendantes (15,5 dB de gain au maximum), et vers l'ASE autour de 1583 nm (23,4 dB de gain au maximum). Cela engendre une diminution de la puissance à 1480 nm (-19,6 dB au maximum). De plus, cette diffusion Raman engendre des pertes de la puissance des données, car il existe un transfert de puissance de 1550 nm (-4,9 dB de pertes) vers l'ASE autour de 1583 nm. La double rétrodiffusion Rayleigh et la diffusion Raman spontanée engendrée dans la fibre sont négligeables. Pour notre dispositif expérimental, la diffusion Brillouin reste aussi négligeable et ne sature pas le gain Raman. Le fait d'avoir une largeur de bande spectrale large réduit de manière significative l'impact de ce phénomène.

Notre modèle étant valide, nous pouvons envisager de modifier certains paramètres de sorte à analyser leur impact sur les performances du système.

## Conclusion du chapitre 3

L'objectif de ce chapitre consistait à présenter la caractérisation du dispositif en régime statique. Dans un premier temps, nous avons détaillé la méthode expérimentale choisie pour relever la puissance en différents points du dispositif. Nous avons présenté quelques spectres relevés en ces points et ainsi montré que la puissance à 1480 nm et les données à 1550 nm sont transmises correctement. Nous avons par ailleurs observé que la SLHP émettait de la puissance autour de 1583 nm : l'onde générée est l'ASE. Nous avons supposé que cela provenait de la diffusion Raman spontanée amplifiée créée à l'intérieur de la source et elle-même amplifiée lors de la propagation. Le gain obtenu par diffusion Raman permet d'amplifier les données, mais malheureusement aussi l'ASE générée autour de 1583 nm, et ce au détriment des données. En conséquence, la puissance à 1480 nm subit des pertes supplémentaires lors de la propagation lorsque la puissance de la SHLP est supérieure à 33 dBm.

Le phénomène majeur mis en évidence lors de cette caractérisation statique est l'amplification Raman. Étant donné son importance dans notre dispositif, nous avons étudié l'impact de ce phénomène sur la transmission des ondes. Sachant que le gain Raman est maximal à 1583,1 nm, soit pour un écart en fréquence de 13,2 THz de la fréquence pompe, nous avons transmis la puissance et les données en modifiant la longueur d'onde des données. Les résultats montrent bien que le gain est meilleur à 1585 nm par rapport à 1550 nm. Néanmoins, il faut prendre en compte le fait que les données à 1585 nm se superposent au bruit généré par la diffusion Raman spontanée et amplifiée. Dans certaines conditions (puissance de la SLHP forte), nous ne parvenons même plus à les distinguer. Afin de détecter correctement les données, nous avons finalement choisi de les conserver à la longueur d'onde de 1550 nm, au prix d'un plus faible gain.

Lors des caractérisations statiques, nous avons étudié le comportement de la puissance des données dans chaque configuration : transmission co-propagative, transmission contra-propagative ou transmission co- et contra-propagatives ensemble. Nous avons calculé le bilan de liaison à partir des résultats expérimentaux et nous avons observé que l'évolution de ce bilan en fonction de la puissance de la SLHP est similaire quelle que soit la configuration de propagation. Nous avons aussi noté que ce bilan augmente avec la puissance de la SLHP jusqu'à 34 dBm. Puis il diminue entre 34 dBm et 36 dBm car la puissance de la SLHP diminue à 1480 nm, en raison du décalage Stokes de la puissance autour de 1583 nm. Le bilan révèle que le gain obtenu par diffusion Raman compense l'atténuation de la fibre et les pertes du système lorsque la puissance de la SLHP est comprise entre 33 dBm et 35 dBm, et dans ce cas nos données sont amplifiées. Nous avons constaté que le fait de transmettre des données co- et contra-propagatives ensemble ne provoquent pas de changement. Au terme de cette étude, nous avons choisi de fixer la puissance du laser de données descendantes soit à -3 dBm, soit à 0 dBm au maximum, et la puissance du laser de données montantes à -3 dBm. Ces puissances correspondent à celles émises par des lasers faiblement consommant prévus pour notre application. Nous bénéficierons au mieux de l'amplification Raman sans qu'il y ait de saturation.

Par ailleurs, nous avons observé que les données sont accompagnées d'une part non négligeable de la puissance de l'ASE autour de 1583 nm et d'un résidu de l'onde de données contra-propagative (par rapport à l'onde de données considérée). Nous devons donc utiliser un filtre optique suffisamment fin pour sélectionner les données souhaitées. De plus, ce filtre optique doit être capable de supporter la puissance incidente provenant de l'ASE. Dans le

cadre du prototype il est également concevable de sélectionner les sources laser de données, afin que leurs longueurs d'onde soient suffisamment écartées.

Afin de compléter l'étude en régime statique, nous avons modélisé la propagation des ondes dans une fibre optique longue de 10 km. Pour cela, nous avons établi les équations d'évolution de la puissance à 1480 nm, des données à 1550 nm et de l'ASE autour de 1583 nm. Nous avons pris en compte différents phénomènes : la diffusion Raman, la diffusion Brillouin, la rétrodiffusion Rayleigh, et donc l'atténuation de la fibre. Les résultats obtenus par simulation concordent avec les mesures expérimentales. Nous nous sommes ensuite appuyés sur ce modèle pour analyser la contribution respective des différents phénomènes dans l'évolution de la puissance de chaque onde. Nous avons ainsi montré que la diffusion Raman stimulée régit en grande partie l'évolution des puissances. Les données et l'ASE sont effectivement amplifiées de manière significative par diffusion Raman stimulée grâce à la présence de la puissance à 1480 nm. Nous pouvons d'ailleurs remarquer que le transfert de puissance vers l'ASE autour de 1583 nm est suffisamment important pour réduire la puissance à 1480 nm de l'ordre de 20 dB, lorsque la SLHP émet 36 dBm, et réduire le gain Raman bénéfique aux données. De plus, le transfert d'énergie fonctionne également entre les données à 1550 nm et l'ASE autour de 1583 nm, diminuant la puissance des données lorsque la puissance de la SLHP est supérieure à 34 dBm. Par ailleurs, nous avons montré que la diffusion Brillouin est négligeable, malgré le niveau d'énergie mis en jeu à 1480 nm et autour de 1583 nm. Heureusement, cet effet est limité par la largeur spectrale, qui est plus grande que celle nécessaire pour voir apparaître la diffusion Brillouin. En perspectives, nous pourrions donc utiliser ce modèle validé, pour étudier l'impact de la diffusion Brillouin dans le cas d'une SLHP dont la largeur de raie est plus fine, ou encore observer l'évolution des puissances en l'absence de l'ASE générée initialement par la SLHP, ce qui reviendrait expérimentalement à filtrer la SLHP autour de 1480 nm.

Dans le chapitre suivant, notre dispositif étant caractérisé d'un point de vue statique, nous étudierons la propagation des données en régime dynamique. Nous caractériserons en particulier la qualité du signal par la mesure du BER, puis par la mesure de la pénalité en puissance. Ces mesures seront complétées par le relevé de diagrammes de l'œil. Nous savons à présent que les données seront amplifiées lors de la propagation en fonction de la puissance de la SLHP, et qu'une ASE autour de 1583 nm est générée par la SLHP à partir de 33 dBm. Dans notre étude, nous devons donc tenir compte de l'effet bénéfique de la diffusion Raman par son gain, mais aussi de son effet préjudiciable sur le bruit ajouté aux données par l'ASE.

# Chapitre 4 : Caractérisation en régime dynamique et synthèse des résultats sur le dispositif

## Sommaire

Introduction du chapitre 4 .....	132
4.1. Dispositif de qualification de la transmission du signal.....	133
4.1.1. Dispositif expérimental .....	133
4.1.2. Taux d'erreur binaire et pénalité en puissance .....	135
4.1.3. Diagramme de l'œil .....	135
4.1.4. Conditions de mesures .....	136
4.2. Qualification du signal transmis.....	139
4.2.1. Superposition de la puissance et des données co- ou contra-propagatives.....	139
4.2.2. Superposition de la puissance et des données échangées simultanément.....	141
4.2.3. Diffusion Raman : transfert de RIN.....	144
4.3. Synthèse des résultats .....	148
4.3.1. Validité du prototype .....	148
4.3.2. Mesures à une fréquence de 5 MHz.....	149
4.3.3. Interface électronique.....	151
Conclusion du chapitre 4.....	153

## Introduction du chapitre 4

Nous avons caractérisé dans le chapitre précédent le dispositif expérimental en régime statique. Nous avons montré dans un premier temps que la transmission de données dans le sens montant ou descendant en présence de puissance est possible sans subir de dégradations trop importantes.

Par ailleurs, nous avons mis en évidence l'amplification des données par diffusion Raman stimulée. Bien que l'amplification soit maximale autour de 1583 nm avec une pompe à 1480 nm, nous avons choisi de conserver les données à la longueur d'onde de 1550 nm en raison de l'ASE (Amplified Spontaneous Emission) non négligeable autour de 1583 nm, générée lorsque la puissance de la SLHP (Source Laser de Haute Puissance) est supérieure à 25 dBm. Nous devons tenir compte de cette ASE, car la puissance délivrée par la SLHP doit être supérieure à 30 dBm afin de recueillir plus d'une centaine de milliwatts électriques sur le terminal. Finalement, d'après les résultats expérimentaux, nous choisissons d'utiliser la SLHP avec une puissance comprise entre 30 dBm et 36 dBm, et de fixer la puissance du laser de données descendantes à -3 dBm ou 0 dBm ; la puissance des données montantes est en revanche ajustée à -3 dBm.

Dans ce dernier chapitre, nous caractérisons le dispositif expérimental en régime dynamique, c'est-à-dire que les ondes portant les données descendantes et montantes sont modulées. Notre objectif consiste à étudier la qualité de la transmission des données transmises dans le dispositif.

Nous présentons tout d'abord le banc de caractérisation permettant de qualifier la transmission des données en régime dynamique (section 4.1). Nous décrivons le matériel et nous présentons le protocole expérimental employé pour réaliser une étude précise de la qualité de transmission. Nous décrivons la mesure du taux d'erreur binaire (BER : Bit Error Ratio), qui nous permet ensuite de déterminer la pénalité en puissance de la chaîne complète. Nous décrivons également la mesure du BER à partir des diagrammes de l'œil, qui sont aussi utilisés pour obtenir des informations complémentaires sur la qualité du signal transmis.

Ensuite (section 4.2), nous présentons les résultats obtenus. Nous étudions la qualité de transmission des données pour différentes configurations de superposition de la puissance et des données.

Finalement (section 4.3), nous synthétisons les résultats des caractérisations, afin de choisir la meilleure configuration que nous puissions proposer, dans le cadre de l'extension tout-optique d'un observatoire câblé de fond de mer. Cette dernière analyse est effectuée en prenant en compte les résultats préliminaires obtenus dans l'étude de la partie électronique, étude menée dans le cadre de la thèse de S. Perhirin. Les tests précédents étant réalisés à un débit supérieur à celui exigé pour notre application principale, de nouveaux tests sont effectués à 5 MHz.



## 4.1. Dispositif de qualification de la transmission du signal

Les perturbations introduites par la présence de forte énergie sur la fibre, et par des non-linéarités des composants optiques et optoélectroniques, peuvent dégrader sensiblement la qualité des données transmises. La caractérisation en régime dynamique permet d'étudier la qualité de la transmission des données descendantes et montantes dans le dispositif expérimental.

Nous présentons tout d'abord le banc de caractérisation et le matériel de mesure utilisé. Nous définissons les mesures à réaliser pour étudier la qualité du signal, et nous décrivons les paramètres de notre système.

### 4.1.1. Dispositif expérimental

Le montage expérimental utilisé pour qualifier la transmission des données en régime dynamique est présenté sur la Figure 4.1. Sur cette figure, le « dispositif à tester » correspond au dispositif expérimental (c'est-à-dire ici le « dispositif tout-optique ») présenté sur la Figure 3.1, sans le laser des données descendantes (ou montantes). Nous avons inséré un modulateur d'amplitude entre le laser de données descendantes (resp. montantes) et le point  $A_D$  (resp.  $A_M$ ) afin de générer des séquences de données. Les points de mesure  $A_D$ ,  $A_M$ ,  $B_D$  et  $B_M$  correspondent aux entrées et sorties de données. Le matériel de caractérisation sera donc branché en ces points.

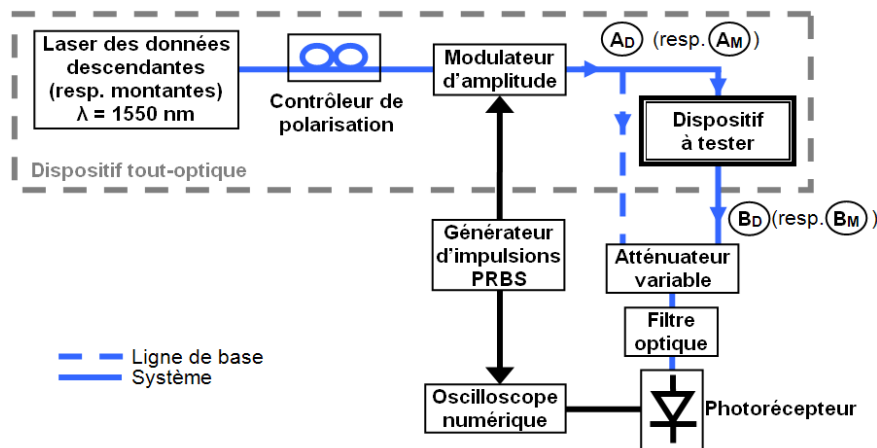


Figure 4.1 : Dispositif expérimental de qualification du BER ( $A_D$ ,  $A_M$ ,  $B_D$ , et  $B_M$ , sont des points de mesure).

Le laser de données (au point  $A_D$  pour les données descendantes et au point  $A_M$  pour les données montantes) est le laser DFB émettant à la longueur d'onde de 1549,5 nm, déjà employé lors de la caractérisation en régime statique (chapitre 2, §2.2.2.b). Dans le cas des données échangées simultanément, nous employons une seconde source DFB disponible au laboratoire, émettant à 1543,5 nm, qui sera connectée au dispositif au point  $A_M$ .

Chaque source laser est connectée à un modulateur. La modulation de chaque faisceau laser des données est réalisée par l'emploi d'un modulateur d'amplitude Mach-Zehnder SD-10-A de la société Oti, avec un débit maximal de 10 Gbit.s<sup>-1</sup>. Le modulateur externe étant sensible à la polarisation, un contrôleur de polarisation est inséré après le laser. Le modulateur est commandé par une tension externe provenant d'un générateur d'impulsions de séquence de bits pseudo-aléatoires (PRBS : Pseudo Random Bit Sequences). Le générateur, lié à la source émettant à 1549,5 nm, est un HP70841B, pouvant générer un débit compris entre

100 Mbit.s<sup>-1</sup> et 3 Gbit.s<sup>-1</sup> ; il est piloté par une horloge délivrée par le générateur de signal HP70322A. Le générateur, lié à la source émettant à 1543,5 nm est le HP8133A, permettant de générer un débit compris entre 35 Mbit.s<sup>-1</sup> et 3 Gbit.s<sup>-1</sup>.

Les données sont récupérées au point B<sub>D</sub> ou au point B<sub>M</sub> par le dispositif de mesure. Celui-ci est constitué d'un atténuateur optique variable, d'un filtre optique passif, d'un module de réception et d'un oscilloscope numérique.

Le module de réception employée est un photorécepteur HCA-S de la société FEMTO. Ce module de réception associe une photodiode et un amplificateur à transimpédance. Il est capable de détecter un signal continu ou modulé à une fréquence inférieure à 210 MHz. Il amplifie le signal reçu avec un gain de conversion de  $1,9 \cdot 10^4$  V/W à 1550 nm. La puissance optique incidente maximale est égale à -12,2 dBm (60 µW) dans le régime linéaire du photorécepteur. À cette puissance, la tension maximale atteint 1,2 V. La caractérisation en puissance du photorécepteur est présentée à la Figure 4.2.

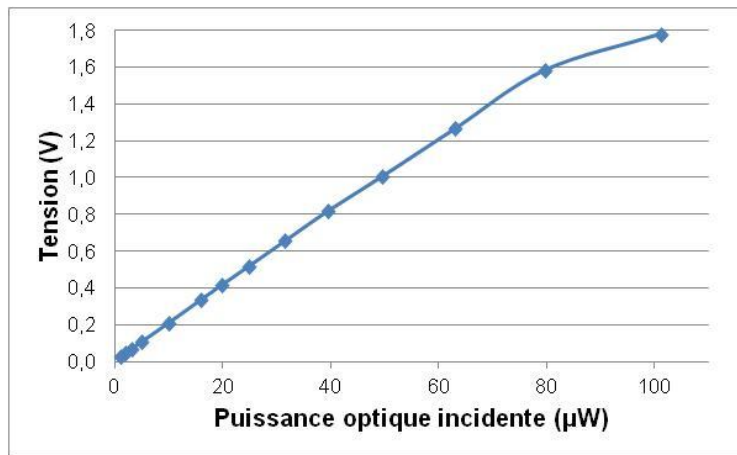


Figure 4.2 : Caractérisation de la conversion puissance/tension du photorécepteur FEMTO HCA-S.

La puissance optique délivrée en sortie de l'extension optique (points B<sub>D</sub> et B<sub>M</sub>) peut atteindre la centaine de milliwatts, nous devons donc insérer un atténuateur optique en amont du photorécepteur pour éviter toute saturation. Nous utilisons un atténuateur variable d'OZ Optics, DA-100-3A-1550-9/125-P-60, centré à 1550 nm avec une largeur de bande optique équivalente à la bande C optique. Il est capable de supporter 200 mW (23 dBm) au maximum. Il possède une perte intrinsèque de 2 dB. De plus, cet atténuateur est nécessaire pour faire varier le niveau de puissance reçue dans le cadre de la mesure du BER.

Un filtre optique TF-11-11-1520/1570-9/125-5-60-3A3A-3-1-1.2-HP d'OZ Optics, de bande passante optique égale à 1 nm, accordable manuellement dans une plage de 1520 nm à 1570 nm, est ajusté à 1550 nm. Il est placé entre l'atténuateur et la photodiode. Ses pertes d'insertion sont égales à 2,0 dB. Il permet de rejeter la puissance résiduelle provenant du laser de puissance, et donc l'ASE, ainsi que la puissance des signaux de données rétrodiffusés.

Le signal électrique en sortie du photorécepteur est dirigé selon le cas soit vers l'analyseur de taux d'erreur HP70842A pour mesurer le BER, soit vers l'oscilloscope numérique HP83480A, qui permet de réaliser des diagrammes de l'œil. L'analyseur de taux d'erreur mesure le BER pour un débit compris entre 100 Mbit.s<sup>-1</sup> et 3 Gbit.s<sup>-1</sup>. L'oscilloscope numérique permet de réaliser des diagrammes de l'œil à un débit compris entre 100 Mbit.s<sup>-1</sup> et 12 Gbit.s<sup>-1</sup> avec un maximum de 2 V d'amplitude pour le signal électrique incident.

Ce dispositif permet d'évaluer le BER de tout le système placé entre les points  $A_D$  (resp.  $A_M$ ) et  $B_D$  (resp.  $B_M$ ) en fonction de différents paramètres. Le BER mesuré en présence du système optique sous test est comparé à celui mesuré sans le système, c'est-à-dire la ligne de base. Le BER peut être soit mesuré directement avec l'analyseur de taux d'erreur, soit estimé à partir du diagramme de l'œil.

#### 4.1.2. Taux d'erreur binaire et pénalité en puissance

Le taux d'erreur binaire permet de caractériser la qualité de transmission du signal en évaluant la probabilité d'erreur de transmission. Il s'agit du rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits transmis.

La mesure du BER nous permet également de remonter à la pénalité en puissance. Il s'agit de déterminer la puissance optique supplémentaire et nécessaire pour compenser les dégradations du signal subies par le système, pour un BER donné. Nous mesurons tout d'abord le BER de la ligne de base en fonction de la puissance optique moyenne du signal reçu. Pour cela, nous faisons varier la valeur de l'atténuateur variable. Puis nous mesurons le BER du signal transmis dans le système en fonction de la puissance optique moyenne du signal reçu. La mesure de la pénalité en puissance est uniquement réalisée dans le cas de la transmission simultanée de l'énergie et des données descendantes et montantes.

Une autre manière de caractériser la qualité de la transmission est d'extraire des informations à partir du diagramme de l'œil afin de mesurer de façon indirecte le BER. Les déformations du signal portant les données, qui apparaissent lors de sa propagation, engendrent naturellement de l'interférence inter-symboles qui se traduit par une dégradation du diagramme de l'œil.

#### 4.1.3. Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil consiste à superposer de manière répétée des séquences binaires dans une fenêtre temporelle de l'oscilloscope numérique. La Figure 4.3(a) présente un diagramme de l'œil, sur lequel sont indiquées les principales caractéristiques qui permettent de remonter aux indicateurs de la qualité de transmission du signal.

Le BER est calculé à partir de la densité de probabilité du signal dans la zone centrale de l'œil, avec une largeur temporelle de 20% de l'œil. Nous pouvons relever un histogramme des points présents dans cette zone avec l'oscilloscope numérique. Un exemple est présenté sur la Figure 4.3(b).

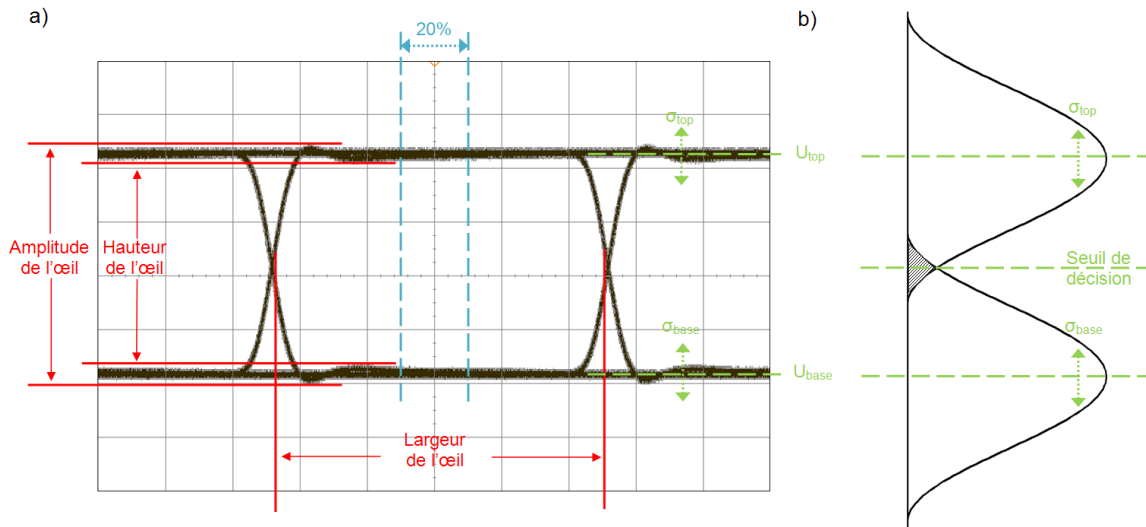


Figure 4.3 : (a) Exemple d'un diagramme de l'œil, accompagné des indications de mesure et (b) mesure de l'histogramme, servant à la mesure du BER.

L'étude de l'histogramme nous permet d'estimer le BER avec le calcul suivant, avec l'hypothèse que les densités de probabilité des niveaux haut et bas sont celles d'un bruit gaussien :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q_{factor}}{\sqrt{2}} \right) \quad (4.1)$$

avec :

$\operatorname{erfc}$  la fonction d'erreur complémentaire définie par :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-\alpha^2) d\alpha \quad (4.2)$$

$Q_{factor}$  le facteur de qualité : il s'agit du rapport entre l'ouverture de l'œil et le bruit présent dans l'œil, et il fournit une figure de mérite de l'œil ; dans notre cas, le calcul est le suivant :

$$Q_{factor} = (U_{top} - U_{base}) / (\sigma_{top} + \sigma_{base}) \quad (4.3)$$

avec :

$U_{top}$  (resp.  $U_{base}$ ) la tension moyenne du niveau haut (resp. du niveau bas),  
 $\sigma_{top}$  (resp.  $\sigma_{base}$ ) l'écart type autour de la tension moyenne du niveau haut (resp. du niveau bas),

Nous notons que ces indicateurs requièrent les mesures de  $U_{top}$ ,  $U_{base}$ ,  $\sigma_{top}$  et  $\sigma_{base}$ , qui pourront être réalisées avec l'oscilloscope numérique.

#### 4.1.4. Conditions de mesures

Nous exposons dans la suite les conditions expérimentales utilisées pour la mesure du BER.

Tout d'abord, nous effectuons la mesure du BER en  $A_D$ ,  $A_M$ ,  $B_D$  et  $B_M$  dans plusieurs cas de superposition de l'énergie et des données, comme c'était le cas en régime statique :

- transmission des données descendantes seules, puis en présence de l'énergie ;
- transmission des données montantes seules, puis en présence de l'énergie ;

- transmission simultanée des données descendantes et montantes, puis en présence de l'énergie.

Chaque configuration est testée avec des puissances optiques, un indice de modulation et un débit de transmission définis ci-après.

En ce qui concerne le choix de la puissance du laser apportant l'énergie à 1480 nm, trois niveaux de puissances sont étudiés :

- 36 dBm, la puissance maximale délivrable étant donné que le dispositif doit fournir le maximum d'énergie au terminal,
- 33 dBm, qui est la puissance correspondant au seuil d'apparition du transfert de puissance autour de 1583 nm. Rappelons que ce transfert correspond à l'ASE et peut donc engendrer du bruit pour les signaux de données,
- 30 dBm, puissance pour laquelle l'ASE autour de 1583,1 nm est négligeable.

Quant à la puissance maximale des lasers de données, nous choisissons de la fixer à -3 dBm, comme défini à la fin du chapitre 3. Rappelons que nous avons montré précédemment que l'amplification Raman était identique quel que soit le niveau des données.

Généralement, le débit employé dans les réseaux câblés d'observatoires sous-marins est de l'ordre du Mbit.s<sup>-1</sup>. En ce qui concerne notre extension, nous avons fixé le débit à 5 Mbit.s<sup>-1</sup> comme objectif dans le cadre du travail sur la partie électronique de l'instrument. Cependant, pour cette étude de caractérisation dynamique, nous avons augmenté le débit à 150 Mbit.s<sup>-1</sup>, pour tenir compte tout d'abord des appareils de mesure disponible au laboratoire et ensuite de sorte à effectuer des mesures de BER en un temps « raisonnable » avec une incertitude acceptable et une erreur de mesure inférieure à 10%. Ainsi, dans l'objectif de pouvoir mesurer un BER de 1.10<sup>-12</sup>, notre mesure dure environ deux heures.

Le dernier critère à évoquer est l'indice de modulation  $m$ , que nous définissons par l'expression suivante :

$$m = \frac{P_{top} - P_{base}}{P_{top} + P_{base}} \quad (4.4)$$

avec :

$P_{top}$  la puissance optique moyenne du niveau haut,

$P_{base}$  la puissance optique moyenne du niveau bas.

Ce critère correspond au rapport entre la différence entre les puissances haute et basse, et leur somme. Dans nos expériences, nous choisissons de fixer l'indice de modulation à 0,5, valeur maximale que nous pouvons atteindre étant donné le générateur de signal à notre disposition.

Par ailleurs, la puissance incidente maximale au niveau du photorécepteur FEMTO est fixée à -18 dBm, car il s'agit de la puissance maximale atteinte par les données en l'absence d'amplification. En présence de l'amplification, la puissance des données peut effectivement atteindre -13 dBm, mais nous souhaitons comparer le BER pour le même niveau de puissance. De plus, lors de nos mesures, nous avons constaté que le BER est minimal à cette puissance et ne varie pas entre -18 dBm et -13 dBm, lorsque les données sont amplifiées. Nous ferons varier ce niveau de puissance entre -18 dBm et -26 dBm pour la mesure de la pénalité en puissance.

À présent, nous avons décrit le dispositif de mesure que nous avons mis en place afin de qualifier la transmission des données dans notre architecture d'extension tout-optique, ainsi que les conditions expérimentales et l'ensemble des mesures que nous souhaitons réaliser. Pour résumer, les données sont émises avec une puissance maximale de -3 dBm, avec un taux de modulation égal à 0,5, et à un débit de  $150 \text{ Mbit.s}^{-1}$ . La puissance de la SLHP est fixée à 30 dBm, 33 dBm ou 36 dBm. Nous présentons dans la suite les résultats obtenus.

## 4.2. Qualification du signal transmis

Dans cette section, nous présentons la qualification de la transmission du signal transmis dans le dispositif d'opto-alimentation, réalisée en mesurant le BER et en relevant le diagramme de l'œil.

Dans un premier temps, nous présentons les résultats de la transmission des données descendantes ou montantes à un débit de  $150 \text{ Mbit.s}^{-1}$ , en présence ou non de la puissance. Puis nous complétons ce travail dans le cas de l'échange bidirectionnel des données avec la puissance. Enfin, nous discutons des résultats, que nous confrontons à nos résultats issus de la bibliographie.

### 4.2.1. Superposition de la puissance et des données co- ou contra-propagatives

Dans cette première partie, seulement un des flux de données est transmis en présence ou non de la puissance. Les BER, que nous avons mesurés aux différents points de mesure, sont donnés dans le Tableau 4.1. La puissance optique maximale incidente sur le photorécepteur est égale à  $-18 \text{ dBm}$ .

$P_{\text{SLHP}}$	BER mesuré aux différents points de mesure		
	$A_D$ et $A_M$ (ligne de base)	$B_D$	$B_M$
0 mW	$< 1,0.10^{-12}$	$< 1,0.10^{-12}$	$< 1,0.10^{-12}$
30 dBm		$4,0.10^{-12}$	$< 1,0.10^{-12}$
33 dBm		$1,8.10^{-6}$	$< 1,0.10^{-12}$
36 dBm		$9,9.10^{-2}$	$2,3.10^{-8}$

Tableau 4.1 : BER mesurés aux différents points de mesure du dispositif selon la puissance de la SLHP.

Avant de commenter ces résultats, nous montrons ci-après (Figure 4.4) les diagrammes de l'œil relevés aux différents points de mesure du dispositif ( $A_D$ ,  $A_M$ ,  $B_D$  et  $B_M$ , sur la Figure 3.1), en fonction de la puissance de la SLHP. Ils ont été obtenus dans les mêmes conditions que les mesures de BER.

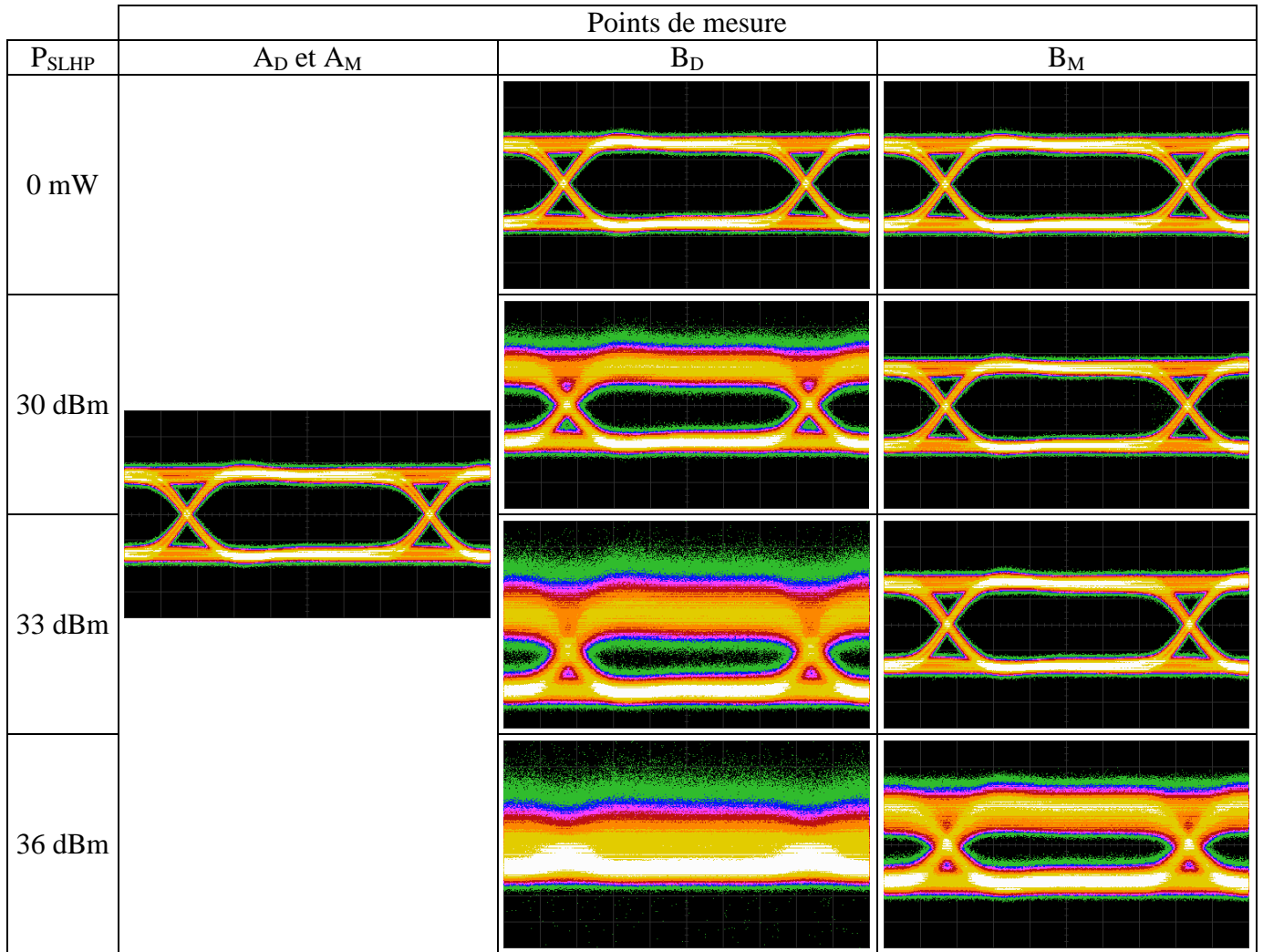


Figure 4.4 : Diagrammes de l'œil relevés en sortie de la source de données ( $A_D$  et  $A_M$ ), en sortie du dispositif dans le sens descendant ( $B_D$ ) et dans le sens montant ( $B_M$ ), selon la puissance de la SLHP.

Nous avons vérifié que le BER calculé à partir du diagramme de l'œil est en accord avec le BER mesuré directement.

Nous observons, qu'en l'absence de la puissance, les données sont transmises correctement dans le dispositif, aussi bien dans le sens descendant, que dans le sens montant. En effet, le nombre d'erreurs est égal à celui de la ligne de base et les diagrammes de l'œil relevés dans le sens descendant et dans le sens montant sont identiques à celui de la ligne de base. Aucun bruit détectable ne vient affecter les données dans ce cas.

Par contre, dès lors que la puissance et les données descendantes sont superposées, ces dernières sont dégradées, de plus en plus à mesure que la puissance de la SLHP augmente. Les données sont très fortement dégradées ( $BER = 9,9.10^{-2}$ ) lorsque la SLHP atteint une puissance de 36 dBm. L'œil est complètement fermé.

Mais cela n'est pas le cas lors de la superposition de la puissance et des données montantes. Nous notons que d'un point de vue dynamique, notre système n'est plus symétrique, contrairement aux observations faites dans le cadre de la caractérisation en régime statique. Nous expliquons cette dissymétrie dans le § 4.2.3. Dans le cas montant, les données se propagent correctement sans dégradation lorsque la puissance de la SLHP est inférieure ou égale à 33 dBm. Pour une puissance de 36 dBm, le BER est égal à  $2,3.10^{-8}$ .



Nous parvenons donc encore à détecter correctement les données, contrairement au cas des données descendantes.

Par ailleurs, nous avons envisagé que l'augmentation de la puissance des données transmises (en  $A_D$  ou  $A_M$ , Figure 4.1) aurait pu améliorer le BER. Nous avons effectivement augmenté la puissance des données à une valeur maximale de 1 dBm et nous avons relevé un BER identique.

Finalement, nous observons, qu'en présence de la puissance, les données montantes se propagent correctement jusqu'à 33 dBm et restent détectables à 36 dBm ; tandis que les données descendantes se dégradent dès que nous augmentons la puissance de la SLHP.

Nous continuons la qualification en transmettant simultanément les données descendantes et montantes.

#### 4.2.2. Superposition de la puissance et des données échangées simultanément

Nous étudions à présent la qualité de la transmission lorsque les données co- et contra-propagatives sont transmises simultanément en présence ou non de la puissance. Pour cela, nous utilisons la seconde source laser à notre disposition, modulée en amplitude de manière identique à la première source. La puissance optique maximale en sortie de cette source est égale à -3 dBm. Nous mesurons le BER et nous relevons les diagrammes de l'œil aux points de mesure  $A_D$ ,  $A_M$ ,  $B_D$  et  $B_M$ . Le Tableau 4.2 présente les mesures de BER des données descendantes ( $B_D$ ) et des données montantes ( $B_M$ ), en fonction de la puissance de la SLHP. Nous complétons ces résultats en présentant les diagrammes de l'œil correspondant aux mesures de BER (Figure 4.5).

$P_{SLHP}$	BER mesuré aux différents points de mesure		
	$A_D$ et $A_M$	$B_D$	$B_M$
0 mW	$< 1,0.10^{-12}$	$< 1,0.10^{-12}$	$< 1,0.10^{-12}$
30 dBm		$8,0.10^{-12}$	$< 1,0.10^{-12}$
33 dBm		$2,5.10^{-6}$	$< 1,0.10^{-12}$
36 dBm		$1,2.10^{-1}$	$1,4.10^{-8}$

Tableau 4.2 : BER mesurés aux différents points de mesure du dispositif selon la puissance de la SLHP, dans le cas des données échangées.

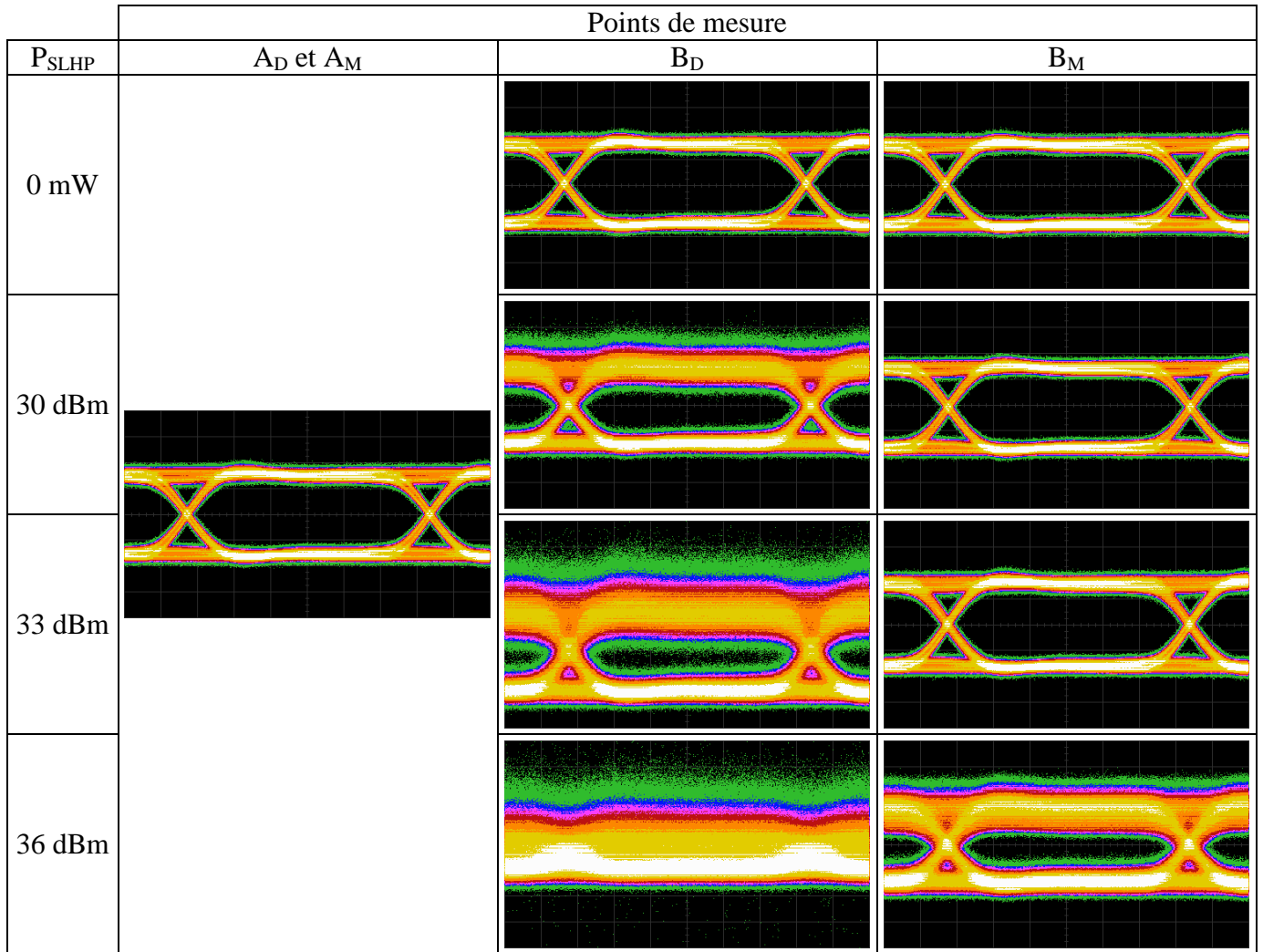


Figure 4.5 : Diagrammes de l'œil relevés en sortie de la source de données ( $A_D$  et  $A_M$ ), en sortie du dispositif dans le sens descendant ( $B_D$ ) et dans le sens montant ( $B_M$ ), selon la puissance de la SLHP, dans le cas des données échangées simultanément.

Nous observons que les résultats obtenus sont quasiment identiques à ceux présentés dans le cas de la transmission d'une seule onde portant des données (Tableau 4.1 et Figure 4.4). Les données sont toujours davantage dégradées dans le sens co-propagatif que dans le sens contra-propagatif. Cette dégradation augmente à mesure que la puissance de la SLHP croît. La superposition d'une onde de données contra-propagative par rapport à l'onde co-propagative n'engendre pas de bruit supplémentaire.

Les précédentes mesures ont été réalisées dans le cas où la puissance optique maximale reçue au niveau du photorécepteur est égale à -18 dBm. Or, nous savons que le BER varie en fonction de cette puissance incidente. Nous proposons de mesurer le BER en fonction de la puissance optique incidente au niveau du photorécepteur. Ces mesures nous permettront de calculer la pénalité en puissance.

Les Figures 4.6, 4.7 et 4.8 présentent les résultats des mesures de BER en fonction de la puissance incidente optique maximale sur le photorécepteur, pour chaque cas de superposition de la puissance et des données :

- Figure 4.6 : transmission des données descendantes ou montantes,

- Figure 4.7 : superposition des données descendantes et de la puissance,
  - Figure 4.8 : superposition des données montantes et de la puissance.
- Nous ajoutons sur chaque figure le BER mesuré dans le cas de la ligne de base.

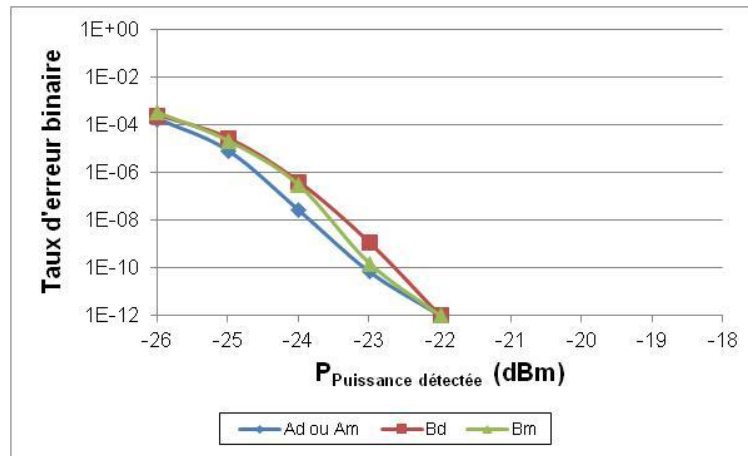


Figure 4.6 : Comparaison des mesures du BER dans le cas de la ligne de base ( $A_D$  ou  $A_M$ ), des données descendantes ( $B_D$ ) et des données montantes ( $B_M$ ) en l'absence de puissance, en fonction de la puissance optique maximale incidente sur le photorécepteur.

Sur la Figure 4.6, les mesures s'arrêtent à -22 dBm, car avons choisi de limiter nos mesures à un BER minimal égal  $1.10^{-12}$ , et au-delà de cette puissance, le BER est inférieur à cette valeur. Nous observons que le BER suit une évolution similaire pour chaque cas. La pénalité en puissance des données transmises dans le dispositif est inférieure à 0,5 dB pour un BER de  $10^{-9}$ . Le dispositif transmet donc correctement les données en l'absence de la puissance avec une pénalité en puissance faible.

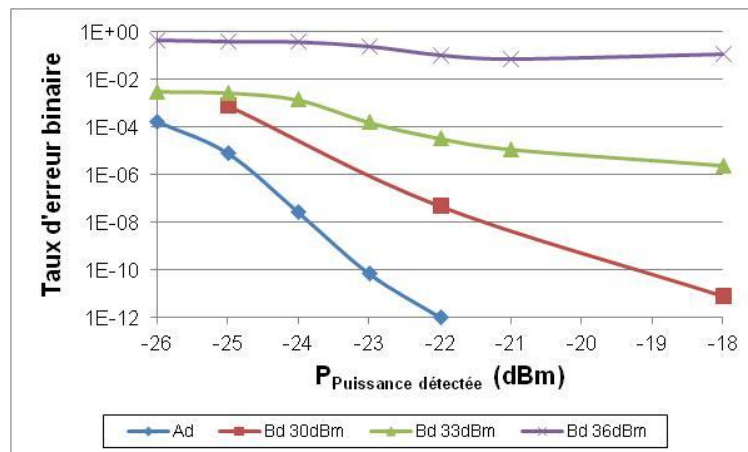


Figure 4.7 : Comparaison des mesures du BER dans le cas de la ligne de base ( $A_D$ ), et des données descendantes ( $B_D$ ) en présence de différents niveaux de la puissance à 1480 nm, en fonction de la puissance optique maximale incidente sur le photorécepteur.

Nous observons sur la Figure 4.7 que le BER des données descendantes tend vers une valeur de saturation à mesure que la puissance détectée sur la photodiode augmente, valeur qui augmente à mesure que la puissance de la SLHP croît. La pénalité en puissance dans le cas de la puissance égale à 30 dBm est de l'ordre de 3 dB pour un BER de  $10^{-9}$ . Le BER mesuré dans le cas de la puissance égale à 33 dBm atteint au mieux la valeur de  $10^{-6}$  et seulement  $10^{-1}$  à 36 dBm. Nous ne pouvons donc pas mesurer la pénalité en puissance des

données superposées à la puissance de 33 dBm et de 36 dBm. Cela signifie que l'augmentation de la puissance incidente ne permet pas de réduire le BER et d'améliorer la qualité de la transmission.

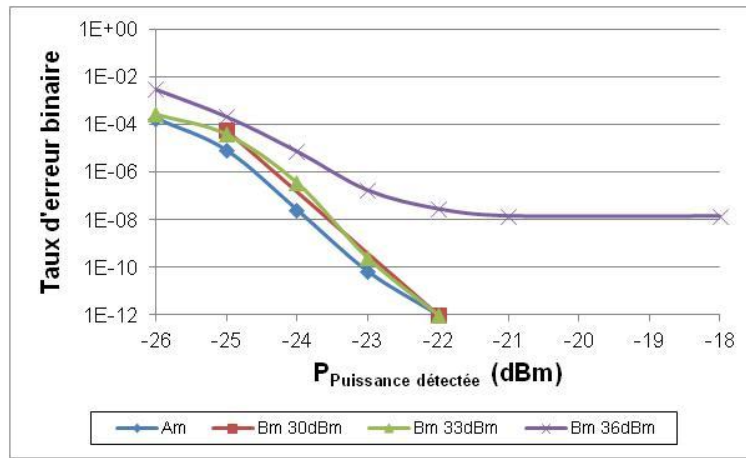


Figure 4.8 : Comparaison des mesures du BER dans le cas de la ligne de base ( $A_M$ ), et des données montantes ( $B_M$ ) en présence de différents niveaux de la puissance à 1480 nm, en fonction de la puissance optique maximale incidente sur le photorécepteur.

Dans le cas de la superposition de la puissance et des données montantes, nous observons sur la Figure 4.8 que le BER suit une évolution similaire à la ligne de base dans le cas de la puissance égale à 30 dBm et à 33 dBm. La pénalité en puissance est inférieure à 0,5 dB pour un BER de  $10^{-9}$ . Par contre le BER tend vers une valeur de saturation de  $10^{-8}$  lorsque la puissance est égale à 36 dBm. Nous ne pouvons donc pas mesurer la pénalité en puissance dans ce dernier cas. L'augmentation de la puissance incidente sur le photorécepteur dans ce cas ne permet donc pas d'améliorer la qualité des données réceptionnées.

Étant donné l'ensemble des résultats, nous concluons qu'il est nécessaire d'éviter de transmettre des données, descendantes ou montantes, en présence de la forte puissance (36 dBm). Contrairement à la co-propagation de la puissance et des données, la contra-propagation de ces deux ondes dégrade de façon moins conséquente les données. Ce phénomène est dû à la diffusion Raman et s'explique par un transfert de RIN (Relative Intensity Noise) de la SLHP vers les données transmises.

Pour résumer, nous pouvons donc transmettre des données contra-propagatives en bénéficiant de l'amplification Raman avec peu de bruit. Dans le cas des données co-propagatives, nous verrons ci-après que le bruit détecté dépend du gain Raman. Il faudrait donc chercher à réduire le gain Raman. Une solution consiste à écarter la longueur d'onde des données descendantes de la longueur d'onde Stokes (1583 nm). Les données bénéficieraient donc moins de l'amplification Raman et leur niveau de puissance serait alors plus faible au niveau du terminal. Cependant, la diminution de la puissance transmise n'est pas un souci car nous sommes libres d'augmenter la puissance émise par le laser de données descendantes, étant donné que celui-ci est directement alimenté au niveau de la BJ (Boîte de Jonction). Cette solution est une des perspectives du travail de cette thèse.

### 4.2.3. Diffusion Raman : transfert de RIN

Dans cette section, nous proposons d'expliquer la dégradation du BER observé expérimentalement en étudiant le transfert de RIN, dû à la diffusion Raman. En effet, la

diffusion Raman stimulée n'amplifie pas seulement le niveau de puissance des données. Elle dégrade également les données co-propagatives et contra-propagatives. Ce transfert de bruit provient de la nature même de la diffusion Raman. En effet, le processus d'amplification se déroule en un temps correspondant aux transitions d'énergie des phonons optiques, de l'ordre de la femtoseconde [Headley 05]. Il se décompose en deux parties :

- le bruit de la diffusion spontanée amplifiée autour de 1583 nm ;
- le transfert de RIN lié au gain Raman.

La première contribution, dans le cadre de notre dispositif, n'est pas problématique car cette onde parasite peut être éliminée en utilisant un filtre optique suffisamment sélectif centré sur nos données (à environ 1550 nm). Par contre, la seconde contribution est beaucoup plus problématique pour notre application. En effet, l'amplification s'accompagne ainsi d'un transfert de RIN de la pompe vers le signal amplifié, dans notre cas, de la SLHP vers les données.

Le RIN caractérise le bruit relatif d'un signal émis par une source laser par rapport à son niveau de puissance. Il est présenté de la façon suivante [Keïta 06] :

$$RIN = \frac{\langle \delta P^2(z,t) \rangle}{\langle P(z,t) \rangle^2} \quad (4.5)$$

avec :

- $\langle P(z,t) \rangle$  la valeur moyenne de la puissance optique  $P(z,t)$ , exprimée en W, se propageant sur la fibre en une position  $z$  et à un instant  $t$ ,
- $\langle \delta P^2(z,t) \rangle$  la valeur moyenne du carré des fluctuations de puissance en une position  $z$  de la fibre et à un instant  $t$  (W).

Pour étudier le transfert de RIN, il faut considérer que le bruit transféré de la pompe existe sur une vaste gamme de fréquence. Nous devons considérer deux cas pour l'analyse du transfert de RIN :

- Le premier, et le moins problématique, est la contra-propagation de la pompe et du signal. Pour expliquer cela, nous assimilons l'onde portant les données à un train d'impulsions et l'onde pompe à une transmission en continu que nous découpons en tronçon. Chaque tronçon représente un niveau de puissance donné, c'est-à-dire la puissance moyenne à laquelle est ajoutée une fluctuation donnée. Lors de la propagation des données contra-propagatives, le train de données subit un transfert de bruit de chaque tronçon de l'onde pompe. Les interactions successives de l'onde des données avec chaque fluctuation de l'onde pompe engendrent un moyennage du transfert de bruit. Donc, l'interaction résultante de deux ondes contra-propagatives est faible. L'impact du transfert de RIN est présent aux faibles fréquences (de l'ordre du kHz) [Bromage 04].
- Le second, et le plus problématique, est la co-propagation de la pompe et du signal. En reprenant l'exemple du train d'impulsions et des tronçons de l'onde de puissance, nous nous rendons compte que le train de données est en phase avec un seul tronçon de l'onde pompe et subit uniquement le transfert de RIN de celui-ci. Le transfert de RIN de l'onde pompe sur les données est donc maximum. Mais, lors de la propagation sur la fibre, les deux ondes subissent une dispersion chromatique dépendant de leur longueur d'onde et du type de la fibre optique. Ces ondes se propagent donc à des vitesses différentes, créant un écart entre elles. Dans l'exemple décrit ci-avant, le train de données est déphasé et subit ainsi un autre transfert de RIN. La dispersion permet donc ainsi de diminuer le transfert de RIN pendant la propagation [Fludger 01]. L'impact du transfert de RIN existe jusqu'aux hautes fréquences (de l'ordre de quelques dizaines de MHz).

Nous avons choisi de modéliser ce phénomène en nous appuyant sur les travaux de C.R.S. Fludger et V. Hanvreck, couramment présentés dans la littérature récente [Fludger 01]. Le RIN de la pompe et des données est défini dans le domaine fréquentielle : nous assimilons le bruit de chaque onde à la somme de fluctuations sinusoïdales, chaque fluctuation correspondant à une fréquence  $f$  comprise dans la bande passante fréquentiel du RIN. Le modèle établi donc comme hypothèse que les puissances de la pompe et des données sont chacune faiblement modulée en amplitude à la fréquence  $f$ .

Afin de calculer le RIN des données,  $RIN_S$ , nous avons besoin de connaître au préalable le RIN de la puissance,  $RIN_P$ . Or, nous n'avons pas mis en œuvre la mesure de ce RIN. Nous pouvons tout de même calculer la fonction de transfert de RIN dans le cas de notre dispositif,  $T = RIN_S/RIN_P$ . Le détail des calculs est exposé en annexe A.

La fonction de transfert de RIN dépend du gain Raman, de la longueur effective de la fibre, et s'exprime en fonction de la fréquence du bruit  $f$ , modulant le signal. Nous avons expliqué ci-avant que le transfert de RIN dépend du sens de propagation du signal par rapport au sens de la pompe. Deux fonctions de transfert existent dans la littérature [Fludger 01] : l'une pour le cas de la co-propagation, et l'autre pour le contra-propagation de la puissance et des données.

Cependant, nous devons rappeler que nous avons observé une déplétion de la puissance, due au transfert de puissance de 1480 nm vers l'ASE autour de 1583 nm. Or, le modèle n'est pas normalement dédié au cas de la déplétion de la puissance. D'après les informations tirées de la littérature [Headley 05], il est tout de même possible d'employer le modèle de C.R.S. Fludger et V. Hanvreck dans le cas de la déplétion de la pompe. Prendre en compte ce phénomène revient à augmenter l'atténuation de la fibre optique, ce qui a pour incidence de réduire la longueur effective, intervenant dans notre calcul.

Nous présentons les résultats de la fonction de transfert du RIN sur la Figure 4.9, appliqué à notre dispositif.

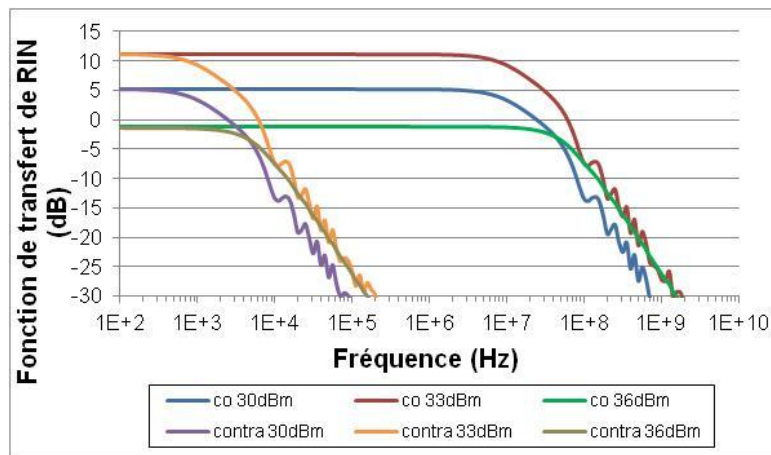


Figure 4.9 : Fonction de transfert de RIN en fonction de la fréquence de modulation de la pompe, dans le cadre de notre application.

Nous observons que le transfert de RIN s'étend sur une plus grande gamme de fréquences dans le cas co-propagatif que dans le cas contra-propagatif. Il existe d'ailleurs un rapport de  $10^4$  entre les fréquences de coupure de ces deux cas. La fonction de transfert de RIN augmente pour une puissance de 30 dBm à 33 dBm car le gain s'accroît. La fréquence de coupure est identique pour ces deux puissances (Figure 4.9 et annexe A). Nous observons que la fonction de transfert de RIN décroît à 36 dBm, et la fréquence de coupure augmente. Ce

phénomène provient de la déplétion de la pompe qui est effective à cette puissance. Or, nous observons dans nos expériences que le signal est très dégradé à cette puissance, à tel point que nous ne parvenons plus à distinguer les données dans le cas de la co-propagation. En fait, nous rappelons que nous calculons ici la fonction de transfert de RIN. Pour faire correspondre ces résultats (Figure 4.9) à ceux obtenus expérimentalement, nous devons calculer le RIN du signal. Or, celui-ci dépend du RIN de la pompe (la SLHP dans notre cas). Cependant, nous pensons que la SLHP devient moins stable à 36 dBm à cause de la puissance rétrodiffusée et de la génération de l'ASE autour de 1583,1 nm. Le RIN de la pompe augmente donc et le RIN du signal en sortie de la fibre augmente en conséquence.

Bien que ces résultats soient cohérents qualitativement, nous ne pouvons pas les comparer à des résultats expérimentaux de façon quantitative car nous n'avons pas mesuré les RIN de la pompe et du signal. Ce travail fait partie des perspectives.

En conclusion, bien que la diffusion Raman stimulée soit utile pour amplifier les données transmises, elle pose problème à cause du transfert de RIN de la SLHP vers les données. Ce phénomène dépend du gain Raman, du type de la fibre optique et de sa longueur. Nous ne pouvons donc pas réduire l'impact de ce phénomène, qui est très important dans le cas co-propagatif. Nous sommes contraints de limiter la puissance de la SLHP à 33 dBm pour obtenir un niveau raisonnable de BER, de l'ordre de  $10^{-6}$ . Il est également concevable de modifier la longueur d'onde des données descendantes afin de réduire le gain Raman et donc le transfert de RIN dans le cas co-propagatif. En effet, nous préférons privilégier l'amplification Raman dans le sens montant dans le cadre de notre application. Dans le paragraphe suivant, nous proposons une synthèse en vue d'évaluer la validité de notre prototype dans le cadre de l'extension d'un observatoire câblé de fond mer.

### 4.3. Synthèse des résultats

La caractérisation en régime statique, ainsi que la caractérisation en régime dynamique nous permettent de mieux nous positionner vis-à-vis du cahier des charges. Nous discutons à présent de la pertinence de notre architecture et de nos choix technologiques pour la transmission d'énergie et de données sous forme optique. Nous confirmons l'étude précédente à la fréquence de 5 MHz, en nous appuyant sur la mesure de chronogrammes. Nous nous intéressons également à la validité de notre prototype dans le cadre plus général de l'extension, en tenant compte du travail réalisé par ailleurs sur la partie électronique.

#### 4.3.1. Validité du prototype

Le Tableau 4.3 récapitule les principaux résultats obtenus lors des caractérisations du dispositif, en fonction de la puissance de la SLHP. Nous y indiquons la puissance électrique recueillie par le module de conversion O/E constitué de quatre cellules photovoltaïques, connectées électriquement en parallèle. L'amplification des données ( $\text{Gain}_{\text{Données}}$ ) est indiquée en fonction du sens de propagation de celles-ci par rapport au sens de propagation de la puissance. Nous notons le BER mesuré en sortie du dispositif (sortie  $B_D$  dans le sens descendant et sortie  $B_M$  dans le sens montant), pour une puissance optique incidente égale à -13 dBm sur le photorécepteur pour se placer dans les meilleures conditions de réception au niveau du photorécepteur FEMTO. Il est nécessaire de noter qu'il manque des mesures de BER dans le Tableau 4.3, que nous n'avons pas réalisées par manque de temps.

$P_{\text{SLHP}}$ (dBm)	$P_{\text{Électrique}}$ (mW)	$\text{Gain}_{\text{Données}}$ (dB)		BER ( $P_{\text{Ph}} = -13$ dBm)	
		Co-prop.	Contra-prop.	Co-prop.	Contra-prop.
30	85	5,2	5,5	$< 1,0 \cdot 10^{-12}$	$< 1,0 \cdot 10^{-12}$
31	107	6,7	6,9	*	$< 1,0 \cdot 10^{-12}$
32	132	8,5	8,9	*	$< 1,0 \cdot 10^{-12}$
33	160	9,9	10,3	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$< 1,0 \cdot 10^{-12}$
34	184	12,6	13,3	*	*
35	203	11,1	11,6	*	*
36	217	7,8	8,8	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$

Tableau 4.3 : Tableau de synthèse de la caractérisation du dispositif en fonction de la puissance de la SLHP (\* : mesure non réalisée).

Nous rappelons les deux objectifs principaux du dispositif d'opto-alimentation :

- 1) Alimenter en énergie le terminal en transportant de la puissance sur fibre optique et recueillir quelques centaines de milliwatts électriques au niveau du terminal,
- 2) Échanger des données sur la même fibre optique en présence de la puissance.

Dans nos conditions expérimentales et d'après nos résultats (Tableau 4.3), nous sommes en mesure de recueillir entre 85 mW et 217 mW électrique au niveau du terminal. Nous aurions dû obtenir davantage de puissance électrique, mais la diffusion Raman engendre une déplétion de la puissance autour de 1480 nm par un transfert de puissance vers l'ASE autour de 1583,1 nm, et réduit ainsi la puissance transmise par le Mux/Démux(2) (Figure 3.1) lorsque la puissance de la SLHP atteint 36 dBm. Nous sommes tout de même capables de



distribuer plus d'une centaine de milliwatts au niveau du terminal si la puissance de la SLHP est supérieure à 31 dBm.

Nous avons relevé que le niveau de puissance des données est amplifié en fonction de la puissance de la SLHP, grâce à la diffusion Raman due à la présence de la puissance à 1480 nm (Tableau 4.3). Le gain apporté permet de compenser l'atténuation de la fibre et les pertes causées par les composants optiques. Ce gain, quasi identique pour la co- et la contre-propagation, est maximum avec une puissance de la SLHP égale à 34 dBm, puis il diminue au-delà de 34 dBm à cause de la déplétion de la puissance de la SLHP. Si nous souhaitons bénéficier de l'amplification Raman pour compenser l'atténuation due à la fibre et les pertes subies par les données, nous devons choisir la puissance de la SLHP comprise entre 32 dBm et 36 dBm.

Cependant, il est important que les données soient correctement transmises en présence de la puissance. Nous avons observé que le dispositif n'engendre pas de bruit significatif en l'absence de puissance. En présence de la puissance, nous avons tout d'abord dû filtrer le bruit dû à la diffusion Raman spontanée amplifiée autour de 1583 nm. Ensuite, les mesures de BER réalisées en présence de la puissance (Tableau 4.3) montrent que les données montantes se propagent correctement, tandis que les données descendantes sont dégradées. Le BER augmente à mesure que la puissance de la SLHP croît. Cela est dû à la diffusion Raman et plus précisément au transfert de RIN de la SLHP vers les données co-propagatives, et dans une moindre mesure vers les données contra-propagatives. La SLHP engendre davantage de bruit au-delà de 33 dBm à cause de l'importance de l'ASE autour de 1583,1 nm. Le transfert de RIN nous entraîne à limiter donc la puissance que nous pouvons émettre en sortie de la SLHP à 33 dBm. Dans ces conditions, la puissance électrique recueillie est de 160 mW et le BER des données descendantes est de l'ordre de  $5.10^{-7}$ , tandis que les données montantes sont parfaitement transmises. Si nous souhaitons améliorer le BER des données descendantes, nous sommes obligés de diminuer la puissance de la SLHP, et donc en conséquence la puissance électrique disponible au niveau du terminal. Ainsi, la marge dont nous disposons sur la puissance de la SLHP, pour diminuer le transfert de RIN, dépend bien sûr de la puissance électrique nécessaire pour le bon fonctionnement du terminal.

### 4.3.2. Mesures à une fréquence de 5 MHz

L'extension optique que nous avons développée est destinée à fonctionner avec un débit maximum des données de  $5 \text{ Mbit.s}^{-1}$ . Nous souhaitons valider la transmission des données à un tel débit. Nous rappelons que nous ne pouvions pas mesurer le BER à cette fréquence car le matériel à notre disposition ne peut pas descendre si bas en fréquence. De plus, mesurer un BER avec une précision acceptable demanderait une très longue durée de mesure rendant l'expérience difficilement réalisable.

C'est pourquoi, nous nous contentons d'une étude qualitative basée sur l'observation avec l'oscilloscope numérique. Nous transmettons un signal carré à la fréquence de 5 MHz et nous relevons des chronogrammes aux différents points de mesure ( $A_D$  ou  $A_M$ ,  $B_D$ ,  $B_M$  sur la Figure 4.1).

Les données sont transmises soit dans le sens descendant, soit dans le sens montant, avec une puissance optique maximale de -3 dBm, avec un indice de modulation de 50%. Nous n'étudions pas le cas des données échangées simultanément car nous avons montré que la propagation de données contra-propagatives n'a pas d'incidence sur les données co-propagatives. Les données sont transmises en l'absence de puissance ou sont superposées à la puissance de la SLHP. Nous faisons varier cette dernière entre 30 dBm et 36 dBm. L'atténuateur variable situé près du photorécepteur est fixé avec une atténuation de 10 dB,

afin de ne pas le saturer, et cela quelle que soit la puissance de la SLHP. Les données subiront donc des pertes de 14 dB en tenant compte des pertes intrinsèques de l'atténuateur et du filtre optique. Les signaux relevés sont présentés sur la Figure 4.10

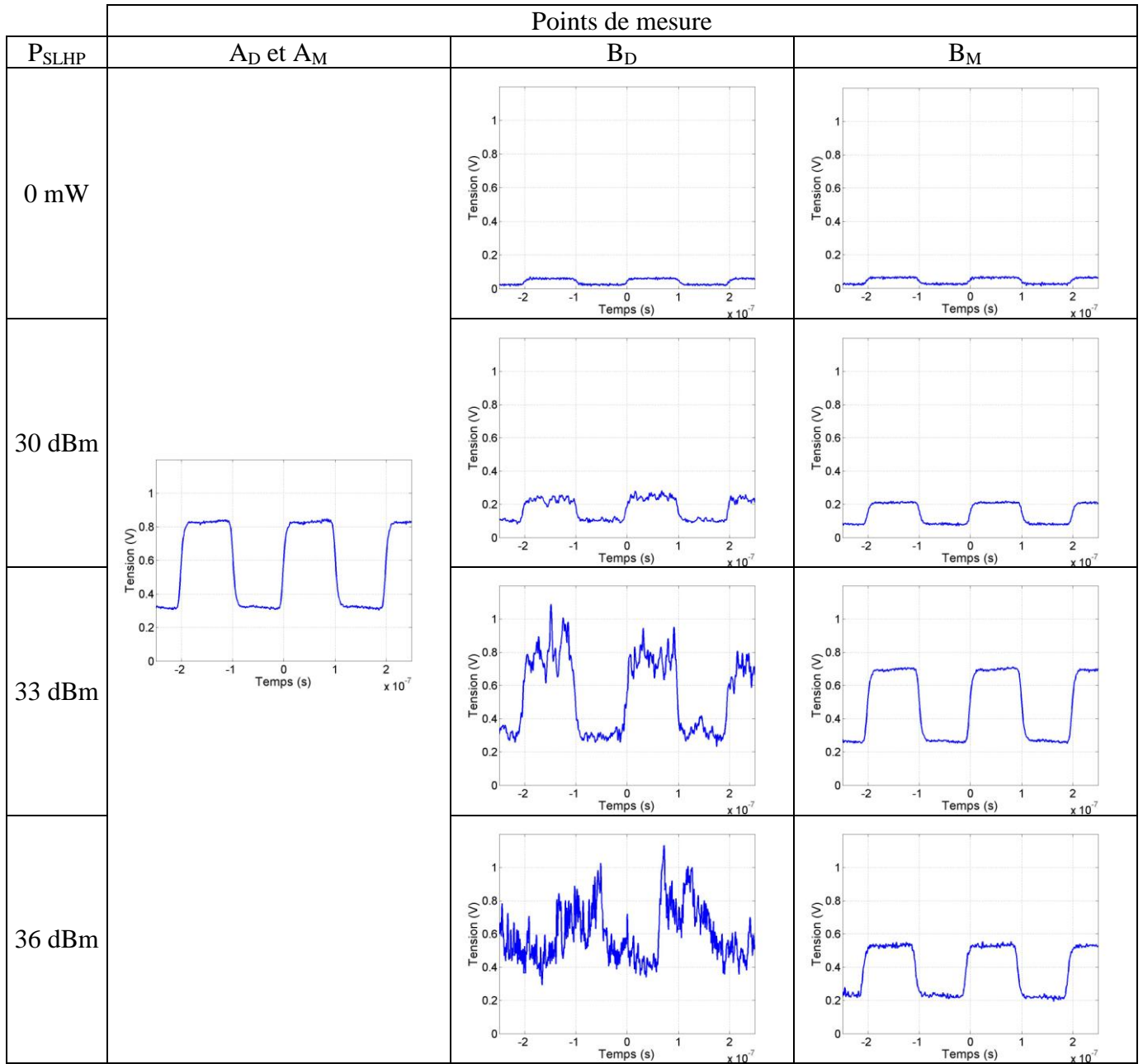


Figure 4.10 : Chronogrammes relevés en sortie de la source de données ( $A_D$  et  $A_M$ ), en sortie du dispositif dans le sens descendant ( $B_D$ ) et dans le sens montant ( $B_M$ ), pour différents niveaux de la puissance de la SLHP.

Tout d'abord, nous observons comme prévu que l'amplitude des signaux augmente à mesure que la puissance de la SLHP croît. La diffusion Raman stimulée amplifie bien le niveau de puissance des données. Ensuite, nous constatons à nouveau que les données co-propagatives sont davantage dégradées que les données contra-propagatives. Ces dernières ne subissent pas de dégradations trop importantes lorsque la SLHP émet une puissance inférieure ou égale à 33 dBm. Enfin les données co-propagatives sont très dégradées lorsque la puissance de la SLHP est supérieure à 33 dBm. De façon qualitative, ces observations

montrent que les résultats obtenus pour un débit de  $150 \text{ Mbit.s}^{-1}$  reste valides pour un débit de  $5 \text{ Mbit.s}^{-1}$ .

Par ailleurs, nous observons sur la Figure 4.10 le bruit caractéristique des sources lasers. En effet, en comparant les chronogrammes à 33 dBm et à 36 dBm, les résultats montrent qu'à une source de bruit blanche due à l'émission spontanée (RIN), se superpose une source de bruit présente à basse fréquence suivant une pente en  $1/f$ , due aux fluctuations de température du milieu à gain de la SLHP [Brahimi 10, Chluda 06].

### 4.3.3. Interface électronique

Afin de répondre à la question posée concernant la puissance électrique nécessaire au bon fonctionnement de l'extension au niveau du terminal, nous devons aborder la partie électronique du projet. Ce travail fait actuellement l'objet d'une thèse, réalisée par Steven Perhirin, dont l'objectif est d'élaborer un module émission/réception optoélectronique de faible consommation électrique [Perhirin 11, Perhirin 12].

#### 4.3.3.a. Fonctionnement général

Nous présentons tout d'abord le fonctionnement général de l'électronique embarquée au niveau du terminal. Le schéma détaillé de l'architecture du terminal est présenté sur la Figure 4.11. Il est constitué de :

- un étage de puissance (composé des cellules photovoltaïques et d'un convertisseur DC-DC), dont le rôle est de récupérer de l'énergie sous forme électrique, et de fournir un niveau de tension stable pour le reste du montage ;
- un étage de transmission de l'information (constitué du module de conversion E/O et du module de conversion A/N (Analogique Numérique), chargé d'envoyer vers la BJ les données converties par le capteur à l'aide d'un laser en respectant un critère strict de faible consommation ;
- un étage de réception de l'information (constitué du module de conversion O/E), afin de récupérer les données descendantes sous forme électrique. Ces données peuvent être des instructions de configuration du module de conversion A/N ou un signal de synchronisation (horloge) lié au protocole de transmission.

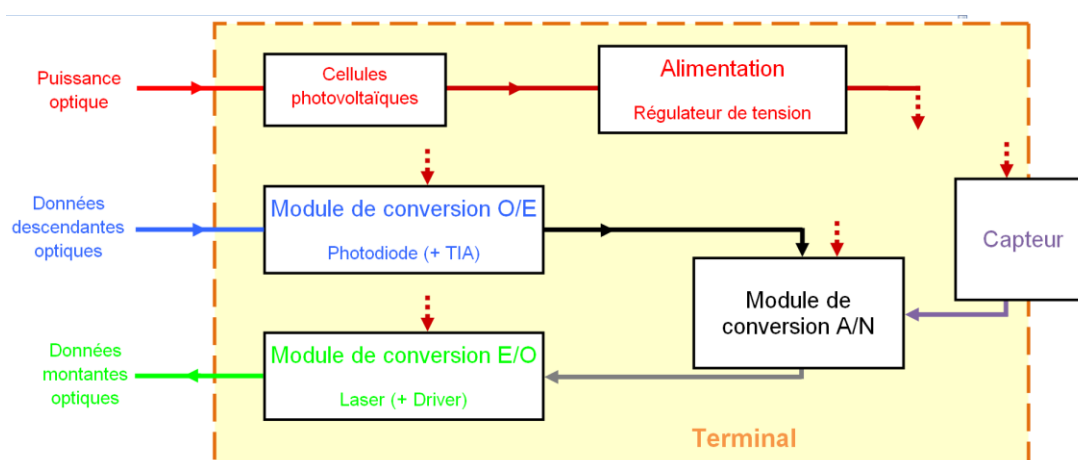


Figure 4.11 : Architecture détaillée du terminal (alimentation : flèche rouge en pointillées).

Les composants doivent être capables de dialoguer suivant le protocole choisi, en respectant les conditions de consommation et de débit imposées par le projet.

Nous nous concentrons à présent sur le fonctionnement détaillé du terminal. La puissance électrique, convertie par les cellules photovoltaïques, est ensuite envoyée sur un régulateur de tension, afin de générer une tension de 3,3 V. Cette tension électrique alimente les différents composants du terminal : le module de conversion O/E, le module de conversion E/O, le module de conversion A/N et le capteur. Nous avons choisi de générer une alimentation à 3,3 V pour des questions liées aux contraintes sur le module de conversion A/N et à la polarisation des composants optiques [Perhirin 11].

Les données descendantes sont converties par une photodiode en InGaAs, dont la bande passante spectrale de détection est comprise entre 1100 nm et 1650 nm avec une puissance maximale incidente de 3 dBm. Sa bande passante électrique est de 2 GHz. Un TIA (TransImpedance Amplifier) est connecté aux bornes de la photodiode. Ce composant permet de transformer une variation d'intensité en une variation de tension.

Le capteur mesure de façon continue et transmet les mesures au CAN. Dans le cadre de l'étude du terminal, il est convenu que le capteur ne réceptionne pas de données, et donc ne nécessite pas d'instruction de commandes. Les données descendantes serviront uniquement à la transmission d'une horloge. Nous avons pris pour exemple un hydrophone, capteur couramment utilisé dans le domaine de l'observation sous-marine.

#### **4.3.3.b. Consommation électrique**

Nous définissons à présent les besoins de l'architecture mise en place. D'après les résultats obtenus lors de la caractérisation du dispositif optique, nous connaissons la puissance électrique qui peut être disponible en fonction de la puissance émise par la SLHP. Il est ainsi possible d'espérer une puissance électrique disponible maximale de 160 mW, valeur obtenue pour une puissance de la SLHP qui permet de recevoir correctement les données descendantes.

Actuellement, le terminal développé pour un hydrophone consomme environ 145 mW à l'initialisation, et 70 mW en continu [Perhirin 12]. Les cellules photovoltaïques du module de conversion O/E sont installées en parallèle pour fournir une tension de 3,3 V. Les tests d'association du dispositif optique et du dispositif électronique ont montré que l'électronique embarquée fonctionne dès lors que la SLHP émet une puissance supérieure à 31 dBm, soit plus de 100 mW de puissance électrique disponible au niveau du terminal. Les données descendantes sont également correctement réceptionnées à un débit de 5 Mbit.s<sup>-1</sup> lorsque la puissance de la SLHP est égale à 33 dBm, malgré le transfert de RIN.

Nous pouvons donc conclure que la puissance électrique que nous délivrons est suffisante pour alimenter le terminal et recueillir convenablement les données issues d'un hydrophone situé à une dizaine de kilomètres de la BJ.

## Conclusion du chapitre 4

Ce chapitre avait pour but de présenter la caractérisation du dispositif en régime dynamique. Afin de réaliser cette caractérisation, nous avons qualifié la transmission des données en mesurant le BER et en relevant des diagrammes de l'œil en différents points de mesure du dispositif, avec et sans présence de la puissance, et en fonction du sens de propagation.

Tout d'abord, la transmission des données descendantes et des données montantes en l'absence de la puissance est comparable à celle de la ligne de base. Les données ne sont pas dégradées lors de leur propagation dans le dispositif long d'une dizaine de kilomètres. Dans le cas de la superposition de la puissance et des données, nous avons constaté que les données montantes sont bien transmises, au contraire des données descendantes qui sont dégradées de plus en plus à mesure que la puissance de la SLHP croît. Ce flux de données est d'ailleurs totalement dégradé lorsque la SLHP émet une puissance de 36 dBm.

Ensuite, nous avons étudié la transmission de données échangées simultanément en présence de la puissance. Les résultats obtenus sont identiques à ceux obtenus précédemment dans le cas d'un seul flux de données. Nous avons relevé le BER en fonction de la puissance optique incidente sur le photorécepteur et nous avons ainsi mesuré la pénalité en puissance de chaque configuration par rapport à la ligne de base. Nous avons constaté que le BER sature à une valeur qui croît en fonction du niveau de puissance de la SLHP.

La différence d'évolution du BER selon la direction de propagation des données provient du transfert de RIN de la SLHP vers les données, dû à la diffusion Raman stimulée. En effet, ce phénomène est davantage actif sur les données co-propagatives que sur les données contra-propagatives, à cause de la différence du sens de propagation de la pompe et des données. Le transfert de RIN peut être calculé en modélisant le bruit de l'onde pompe par une onde modulée en amplitude. À partir des calculs établis dans la littérature, nous avons choisi d'adopter les équations utilisées dans le cas de la non-déplétion de la pompe et nous les avons adaptées au cas de la déplétion de la pompe. Les résultats montrent que le transfert s'effectue à une fréquence inférieure à  $1,2 \cdot 10^3$  Hz pour les données contra-propagatives et à une fréquence inférieure à  $1,2 \cdot 10^7$  Hz pour les données co-propagatives. De plus, l'amplitude du transfert est proportionnelle au gain Raman et au RIN de la SLHP, qui croît pour une puissance supérieure à 33 dBm.

Malgré le fait que nous pourrions collecter bien plus que 100 mW électrique au niveau du terminal, le transfert de RIN nous oblige à limiter la puissance de la SLHP, pour éviter de dégrader les données descendantes. Nous sommes donc amenés à réaliser un compromis entre la puissance électrique délivrable, le gain des données acquis lors de leur propagation, et la limitation du transfert de RIN dégradant les données. Nous avons donc choisi d'utiliser la SLHP avec une puissance comprise entre 30 dBm et 33 dBm. Dans cette gamme de puissance, le choix final de la puissance émise dépend de la puissance électrique nécessaire au niveau du terminal et de la qualité souhaitée des données descendantes. D'après les travaux réalisés sur l'électronique embarquée, le compromis réalisé est satisfaisant pour l'alimentation électrique et la transmission des données.



## Conclusion et perspectives

Ce mémoire est consacré à l'étude d'une liaison toute optique longue de 10 km dédiée à l'extension d'un observatoire câblé de fond de mer. Ces travaux s'intègrent dans le cadre du projet nommé « opto-alimentation pour les observatoires de fond de mer ». Il s'agit d'un projet collaboratif entre l'ENIB et l'IFREMER, qui consiste à proposer une solution innovante pour étendre un observatoire câblé vers une nouvelle zone d'exploration. Ce projet à caractère expérimental doit aboutir à des réalisations de prototypes capables de préfigurer des réseaux plus aboutis. L'extension développée doit transmettre à la fois l'énergie, pour alimenter un terminal déporté, et les données échangées entre la station terrestre et le terminal. La solution retenue doit pouvoir être déployée avec des moyens légers, c'est-à-dire sans l'intervention d'un navire câblé, et à moindre coût.

Une architecture d'extension basée sur la transmission de l'énergie et des données sur une fibre optique unique a été définie. L'objectif du travail de thèse concerne la démonstration de la faisabilité de la liaison optique en évaluant les possibilités, les contraintes et les limites de fonctionnement de l'architecture proposée.

Le premier chapitre du manuscrit est dédié à une étude bibliographique permettant de situer le contexte du projet tant du point de vue des techniques de mesures en milieu marin que du point de vue de la transmission optique. Nous avons tout d'abord décrit l'évolution des observatoires marins. L'étude des différentes architectures proposées dans la bibliographie a montré que les réseaux câblés sont les plus adaptés pour les observations à long terme et en temps réel. Cependant, il s'agit de structures très coûteuses et figées. La solution de l'extension tout-optique, proposée dans ce manuscrit, s'avère flexible. Elle s'appuie sur le concept de la transmission de l'énergie d'alimentation sur fibre optique. L'état de l'art de ce domaine particulier de la fibre optique a montré que les applications les plus nombreuses utilisent des fibres de longueurs allant de quelques centaines de mètres à 2 km. Peu d'études sont consacrées au transport de l'énergie sur 10 km. Néanmoins, cet état de l'art nous a permis de définir les principales caractéristiques de notre système, à savoir les choix de la source laser de puissance, de la fibre optique, et des cellules de conversion O/E. Notons que l'évolution technologique de ces dernières années a vu notamment l'apparition de sources plus puissantes et mieux adaptées au transport de la puissance optique sur une longue distance. Ceci permet de lever quelques verrous technologiques, et ainsi d'espérer obtenir une puissance de quelques centaines de milliwatts électriques à quelques kilomètres de la source.

Lors de ce travail nous avons choisi de transporter la puissance et les données sur une même et unique fibre optique pour réduire les coûts relatifs à la connectique optique sous-marine. Ce choix de la fibre unique est lourd de conséquences. D'une part, il complexifie l'architecture du dispositif que nous avons mis en place. D'autre part, il est à l'origine de l'apparition d'interactions entre l'énergie optique, dédiée à l'alimentation, et les données échangées. Ces interactions sont dues essentiellement aux fortes puissances optiques en présence qui engendrent des phénomènes physiques tels que des effets non-linéaires dans la fibre. Compte tenu de la longueur de fibre nécessaire pour l'application, notre choix s'est naturellement porté sur une fibre SMF-28 « standard », couramment employée en télécommunications optiques.

Le second chapitre est consacré à la description de l'architecture de l'extension et à la justification des choix réalisés pour les différents composants et grandeurs physiques. Les principaux phénomènes physiques générés lors de la propagation de puissance dans la fibre, tels que la diffusion Raman, la diffusion Brillouin, et la fusion de fibre sont présentés. Nous avons conclu que la diffusion Raman joue un rôle très important dans le comportement de l'extension tout optique compte tenu du fort niveau de puissance transporté sur la fibre optique. Par ailleurs nous avons établi que les puissances de seuil Brillouin pour la puissance à 1480 nm et les données à 1550 nm ne seront pas atteintes. Même si cette diffusion existe, son impact reste limité dans notre application.

Cette analyse a abouti à la réalisation concrète du dispositif. Sa mise en place a nécessité l'utilisation de composants optiques et de connecteurs capables de supporter de la forte puissance. De sorte à s'affranchir des problèmes de connectique, la majorité des connexions est réalisée par épissure. Les caractéristiques de l'ensemble des composants intégrés dans l'architecture ont été présentées.

Dans le troisième chapitre, nous avons réalisé la caractérisation en régime statique du dispositif expérimental. On peut estimer les pertes de la puissance d'alimentation sur la chaîne (en tenant compte des Mux/Démux, de la fibre optique, des épissures et de la conversion O/E) à environ 11 dB en considérant un rendement de conversion O/E de 20%. Il est alors possible d'obtenir une puissance électrique de l'ordre de 160 mW au niveau du terminal, lorsque l'on émet une puissance optique de 33 dBm au niveau de la boîte de jonction. De même, les pertes de la puissance des données co ou contra-propagatives sont estimées à environ 10,6 dB (en tenant compte des circulateurs, des Mux/Démux, de la fibre optique, des épissures, et du coupleur 1 vers 4). Il s'agit d'un dispositif symétrique pour les données optiques puisque ces dernières traversent les mêmes composants, mais en sens inverse.

Nous avons relevé des spectres optiques en plusieurs points du dispositif afin d'observer l'évolution des ondes optiques au cours de leur propagation. Nous avons noté les influences importantes de la puissance émise et des caractéristiques spectrales de la SLHP. En raison de la diffusion Raman, de la puissance est générée par ASE autour de 1583 nm lors de la propagation dans la fibre. L'étude de la superposition de la puissance et des données a montré que ces dernières sont amplifiées de manière significative par la diffusion Raman. L'amplification Raman permet de compenser, et même de surcompenser, les pertes du système lorsque la puissance de la SLHP est comprise entre 33 dBm et 35 dBm. Par exemple pour 33 dBm, les données sont amplifiées d'environ 10 dB, ce qui permet d'obtenir un bilan de liaison d'environ -0,5 dB. Cette amplification Raman est identique quel que soit le sens de propagation des données. De plus nous avons montré que le choix de la longueur d'onde des données résulte d'un compromis entre le gain Raman et le rapport signal à bruit. Dans notre dispositif, il est préférable de conserver la longueur d'onde de 1550 nm pour les données, bien que le gain Raman soit maximal autour de 1583 nm. Nous avons choisi de fixer la puissance du laser de données descendantes à -3 dBm ou 0 dBm et la puissance du laser de données montantes à -3 dBm.

La caractérisation expérimentale du dispositif a mis en évidence un certain nombre de phénomènes qui font que les données en présence de la puissance ne se propagent pas sans être perturbées ou amplifiées. Afin d'expliquer ces effets, nous avons élaboré un modèle d'évolution de la puissance des ondes optiques tout au long de leur propagation, qui prend en compte la diffusion Raman, la diffusion Brillouin et la double rétrodiffusion Rayleigh. Nous avons validé ce modèle en comparant les résultats de simulation aux résultats expérimentaux. Ce modèle a également permis de déterminer la contribution de chaque phénomène sur l'évolution de la puissance des ondes. Nous avons montré que la diffusion Raman est



effectivement responsable du gain apporté aux données et du transfert de la puissance de la SLHP de 1480 nm vers l'ASE autour de 1583 nm. Par ailleurs, la diffusion Brillouin et la double rétrodiffusion Rayleigh sont négligeables et n'interviennent pas dans les conditions de notre application. De plus nous avons mis en évidence qu'une partie non négligeable de l'énergie à 1550 nm est transférée vers l'ASE autour de 1583 nm par diffusion Raman.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons caractérisé le dispositif expérimental en régime dynamique. Des mesures de BER et des relevés des diagrammes de l'œil ont montré que les données montantes sont parfaitement transmises, contrairement aux données descendantes qui sont de plus en plus dégradées à mesure que la puissance de la SLHP augmente. Ce phénomène est lié au transfert de RIN, dû à la diffusion Raman. Le bruit des données relevé est étroitement lié au gain Raman. Nous sommes donc obligés de limiter le gain apporté aux données, et donc la puissance émise par la SLHP. D'après nos mesures, il faut que la puissance de la SLHP soit inférieure ou égale à 33 dBm pour obtenir des données descendantes avec un BER inférieur ou de l'ordre de  $10^{-6}$ .

Le bilan de notre étude montre qu'il est possible de transmettre de la puissance et des données co- et contra-propagatives sur une fibre optique longue de 10 km. Pour cela, il est nécessaire de limiter la puissance de la SLHP à 33 dBm pour éviter de dégrader de façon conséquente les données descendantes. Dans ces conditions, la puissance électrique recueillie par le module de conversion O/E est de l'ordre de 160 mW. Cette puissance est suffisante pour alimenter le terminal.

Rappelons que le travail présenté dans ce manuscrit s'insère dans un projet plus général qui concerne la mise en œuvre in situ d'une extension d'un réseau câblé d'observation de fond de mer. Des travaux concernant l'aspect électronique du projet, c'est-à-dire la conception d'une électronique faiblement consommante (au niveau de la boîte de jonction et du terminal) et la mise en place de protocoles de communications, ont été menés en parallèle dans le cadre de la thèse de Steven Perhirin. Un démonstrateur de laboratoire a été assemblé et est aujourd'hui fonctionnel. Une étude de la marinisation de l'extension optique, reliée à un hydrophone, est actuellement en cours à l'IFREMER.

Parmi les nombreuses perspectives de notre travail, nous devons chercher en priorité à améliorer la qualité de la liaison tout optique des données transportées tout en conservant le niveau de puissance incidente sur les cellules photovoltaïques.

Une voie d'amélioration possible concerne la minimisation du transfert de RIN qui dépend du gain Raman et par conséquent de la longueur d'onde du signal à amplifier. Il suffit donc de réduire le gain Raman des données afin de diminuer le transfert du RIN. Étant donné que le transfert de RIN sur les données contra-propagatives est faible, nous nous concentrerons sur les données co-propagatives. Nous pouvons donc envisager de modifier la longueur d'onde des données descendantes de sorte à s'éloigner de la longueur d'onde Stokes pour réduire le transfert de RIN. Cependant, il faudra étudier l'incidence de ce changement sur l'architecture et le niveau de puissance reçu par le terminal. En effet, pour une même puissance des données émise, l'amplification étant moindre, le niveau en réception sera plus faible. Deux pistes seraient alors possibles : soit augmenter la puissance en émission sur la boîte de jonction, soit améliorer le seuil de réception de la photodiode au prix d'une plus grande consommation. Par ailleurs il serait peut être nécessaire de modifier l'architecture du dispositif pour prendre en compte trois longueurs d'ondes assez distantes : la puissance, les données descendantes et les

données montantes. Ceci pourrait nécessiter l'insertion de nouveaux composants optiques, qui en contrepartie engendreraient également des pertes optiques supplémentaires.

Une seconde voie d'amélioration consiste à améliorer la qualité d'émission de la SLHP. D'une part, le choix d'une SLHP avec un niveau de RIN faible, peut être une solution. Une étude comparative de différentes sources serait donc intéressante. D'autre part, la réduction de l'ASE engendrée autour de 1583 nm, pourrait améliorer le rapport signal à bruit. Il serait donc intéressant d'étudier l'influence du filtrage de cette émission ASE en sortie de la SLHP sur le transfert de RIN et par conséquent sur la qualité du signal transmis. De plus, si l'ASE était filtrée, la SLHP subirait une déplétion plus faible de sa puissance à 1480 nm, ce qui permettrait d'amplifier davantage les données descendantes et montantes. Enfin, l'absence ou le faible niveau de puissance de l'ASE engendrerait moins de pertes en puissance du signal de données, dues au transfert de puissance vers l'ASE.

Une autre perspective de ce travail consiste en l'exploitation du modèle simulant l'évolution des puissances optiques, que nous avons validé dans le chapitre 3. Cette mise en équation nous offre une première base de travail solide pour calculer l'évolution des puissances et analyser la contribution des phénomènes tels que la diffusion Raman, la diffusion Brillouin et la rétrodiffusion Rayleigh. Nous envisageons d'utiliser ce modèle en vue de l'optimisation de notre dispositif d'opto-alimentation en modifiant les caractéristiques optiques des différentes sources lasers. Il s'agit par exemple de calculer la saturation causée par la diffusion Brillouin, lorsque nous diminuons la largeur de la raie de la puissance à 1480 nm. Nous pouvons également calculer l'évolution des puissances dans le cas où la SLHP n'engendre pas d'onde Stokes autour de 1583 nm, ce qui correspondrait expérimentalement à filtrer la puissance de la SLHP autour de 1480 nm. Nous pourrions ainsi prédire l'évolution de l'amplification Raman sur les données dans ce cas. Nous devons également chercher à améliorer le modèle de l'évolution des puissances pour considérer des paramètres supplémentaires (la largeur de la source par exemple), et pour parvenir à une étude quantitative précise des phénomènes en jeu.

Enfin, nous pouvons envisager à long terme d'utiliser l'extension tout-optique dans le cadre du déploiement, non pas d'un capteur isolé, mais d'un réseau de capteurs spatialement répartis en fond de mer. La difficulté, autre que les problèmes liés à la puissance optique, consisterait à recueillir une grande quantité d'informations issue des différents capteurs de mesures et de savoir les traiter. Nous pouvons également envisager d'employer notre extension dans un domaine autre que le milieu marin, notamment dans des milieux hostiles où l'utilisation d'un câble électrique est à éviter.

# Annexes

Annexe A.	Modélisation du transfert de RIN .....	161
Annexe B.	Photographies du dispositif expérimental .....	167



## Annexe A. Modélisation du transfert de RIN

Nous nous appuyons sur les travaux de C.R.S. Fludger et V. Hanverreck, couramment présentés dans la littérature récente [Fludger 01]. Le modèle établi pour l'analyse du transfert de RIN a pour hypothèse que le bruit de la pompe correspond à une modulation en amplitude à la fréquence  $f$ .

Les équations d'évolutions des puissances se propageant dans la fibre, et présentées dans le chapitre 3 (équations (3.24) à (3.29)), dépendent de la position  $z$  sur la fibre et, à présent, du temps  $t$ . La puissance de la pompe  $P_P(z,t)$  est définie par :

$$P_P(z,t) = P_{P0} e^{-\alpha_P z} \left[ 1 + m \sin\left(2\pi f \left(t - \frac{z}{V_P}\right) + \varphi\right) \right] \quad (\text{A.1})$$

avec :

- $P_{P0}$  la puissance de la pompe injectée à l'origine dans la fibre (W),
- $\alpha_P$  l'atténuation de la fibre optique à la longueur d'onde de la pompe ( $\text{km}^{-1}$ ),
- $m$  l'indice de modulation,
- $V_P$  la vitesse de groupe de l'onde pompe dans la fibre optique ( $\text{km.s}^{-1}$ ),
- $\varphi$  la phase de la modulation.

Nous devons de même modéliser les puissances du signal et de l'ASE sous la forme de puissances modulées en amplitude. Pour la suite du calcul, il est possible de simplifier les équations en tenant compte uniquement de la diffusion Raman stimulée et de l'atténuation due à la fibre. Nous considérons qu'il n'y pas déplétion de la pompe au cours de la propagation. Nous pouvons ainsi déterminer les équations du RIN du signal en fonction du RIN de la pompe, selon que le signal soit co-propagatif ou contra-propagatif par rapport à la pompe [Fludger 01] :

- co-propagation de la pompe et du signal :

$$RIN_S = RIN_P \cdot ((\ln(G_R))^2) \cdot \frac{(V_S / L_{eff})^2}{(\alpha_P V_S)^2 + (2\pi D \Delta\lambda V_S f)^2} \cdot (1 - 2e^{-\alpha_P L} \cos(2\pi D \Delta\lambda L f) + 2e^{-\alpha_P L}) \quad (\text{A.2})$$

- contra-propagation de la pompe et du signal :

$$RIN_S = RIN_P \cdot ((\ln(G_R))^2) \cdot \frac{(V_S / L_{eff})^2}{(\alpha_P V_S)^2 + (4\pi f T)^2} \cdot (1 - 2e^{-\alpha_P L} \cos(4\pi f T) + 2e^{-\alpha_P L}) \quad (\text{A.3})$$

avec :

- $RIN_P$  et  $RIN_S$  le RIN, respectivement, de la pompe et du signal,
- $G_R$  le gain Raman provenant de la pompe ( $\lambda_P$ ) à la longueur d'onde du signal ( $\lambda_S$ ) apporté à un signal se propageant dans une fibre de longueur  $L$  :

$$G_R = \exp[C_R(\lambda_P, \lambda_S) P_{P0} L_{eff}] \quad (\text{A.4})$$

- $C_R(\lambda_P, \lambda_S)$  l'efficacité de gain Raman de  $\lambda_P$  vers  $\lambda_S$  ( $\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$ ),

- $P_{P0}$  la puissance pompe injectée dans la fibre optique en  $z=0$  (W)

- $V_S$  la vitesse de groupe du signal ( $\text{km.s}^{-1}$ ) définie par :

$$V_S = c / n_{SiO2} \quad (\text{A.5})$$

$c$  la vitesse de la lumière dans le vide ( $km.s^{-1}$ ),  
 $n_{SiO_2}$  l'indice de la fibre optique ( $n_{SiO_2} = 1,4682 @ 1550 \text{ nm}$ )  
 $L_{eff}$  la longueur effective de la fibre optique ( $km$ ), prenant en compte l'atténuation de l'onde pompe et définie par :

$$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha_P L)] / \alpha_P \quad (A.6)$$

$\alpha_P$  le coefficient d'atténuation de la fibre optique à la longueur d'onde pompe ( $km^{-1}$ ),  
 $D$  la dispersion chromatique, dont la valeur dépend de la fibre optique et de la longueur d'onde transmise ( $1,62 \text{ ps.nm}^{-1}.km^{-1} @ 1550 \text{ nm}$  avec une SMF),  
 $\Delta\lambda$  l'écart en longueur d'onde entre le signal et la pompe ( $nm$ ),  
 $f$  la fréquence de modulation du bruit de la pompe ( $Hz$ ),  
 $L$  la longueur de la fibre optique ( $km$ ),  
 $T$  le temps de transit du signal dans la fibre optique ( $s$ ), défini par :

$$T = L / V_S \quad (A.7)$$

Les équations (A.2) et (A.3) se comportent comme l'équation d'un filtre passe bas. Nous pouvons calculer la fréquence de coupure  $f_C$  à -3 dB pour chaque cas en employant les équations existant dans la littérature [Fludger 01] :

- co-propagation de la pompe et du signal :

$$f_C = \frac{\alpha_P}{2\pi.D.\Delta\lambda} \quad (A.8)$$

- contra-propagation de la pompe et du signal :

$$f_C = \frac{\alpha_P.V_S}{4\pi} \quad (A.9)$$

Un exemple de résultats est donné à la Figure A.1, proposé par C.R.S. Fludger. Il s'agit du transfert de RIN dans le cas de co-propagation et de contra-propagation de la pompe et du signal dans une fibre optique SMF longue de 10 km ou de 80 km, avec un gain Raman constant de 10 dB. La pompe a une longueur d'onde égale à 1455 nm et le signal a une longueur d'onde égale à 1550 nm.

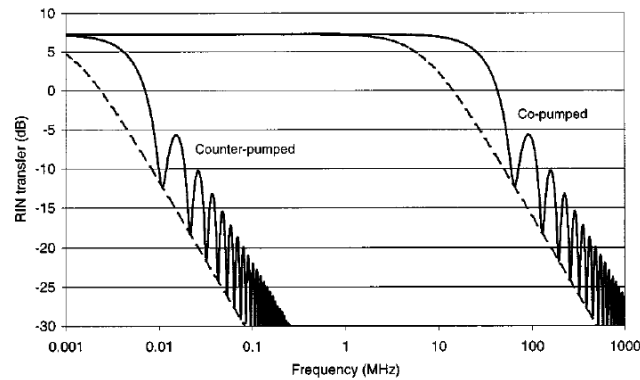


Figure A.1 : Transfert de RIN dans le cas de co-propagation et de contra-propagation de la pompe et du signal en fonction de la fréquence [Fludger 01].

Paramètres :  $\alpha_P = 0.29 \text{ dB/km}$ ,  $L = 10 \text{ km}$  (trait plein) et  $80 \text{ km}$  (trait pointillés),  $D = 15.6 \text{ ps.nm}^{-1}.km^{-1}$ ,  $G = 10 \text{ dB}$ ,  $\lambda_P = 1455 \text{ nm}$ ,  $\lambda_S = 1550 \text{ nm}$ .

Nous constatons tout d'abord que le transfert de RIN est toujours présent à basse fréquence. Ensuite, nous observons que ce transfert de RIN est étendu sur une plus large gamme de fréquence dans le cas de la co-propagation que dans le cas de la contra-

propagation. De plus, il apparaît que la fréquence de coupure augmente si la longueur de fibre diminue. Ce modèle semble bien expliquer la dissymétrie constatée sur la qualité de transmission entre les cas de la co- et de la contra-propagation. Par ailleurs, les oscillations des courbes que nous observons dans le cas d'une fibre longue de 10 km sont justement dues à cette courte longueur de fibre [Headley 05].

Mais, il s'avère que notre pompe subit effectivement une déplétion lors de la propagation, car l'ASE, engendrée par diffusion Raman spontanée en sortie de la SLHP, est ensuite amplifiée par diffusion Raman stimulée. Un transfert de puissance s'opère ainsi de l'onde portant la puissance à 1480 nm autour de l'ASE autour de 1583,1 nm. Nous ne pouvons donc pas simplement utiliser ces équations.

M.D. Mermelstein a modélisé le problème avec quatre équations différentielles afin de résoudre le problème numériquement. La Figure A.2 présente la fonction de transfert de RIN dans le cadre de la déplétion de la pompe [Mermelstein 02]. Les courbes correspondent au cas de co-propagation ou de contra-propagation de la pompe et du signal, dans une fibre SMF de 100 km avec un gain constant de 10 dB. La pompe a une longueur d'onde égale à 1455 nm et le signal a une longueur d'onde de 1550 nm. Il est indiqué sur chaque courbe le niveau de puissance du signal, puis la fréquence de coupure à -3 dB, et enfin la puissance de la pompe nécessaire pour diminuer de 3 dB le RIN.

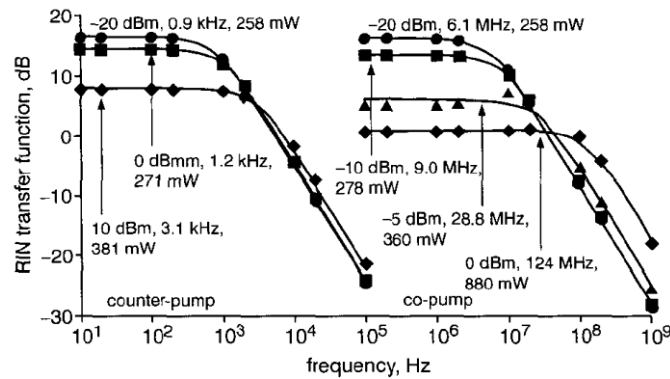


Figure A.2 : Fonction de transfert de RIN en fonction de la fréquence pour les cas de co-propagation et de contra-propagation [Mermelstein 02].

Paramètres :  $\alpha_p = 0.24$  dB/km,  $\alpha_s = 0.19$  dB/km,  $L = 100$  km,  $D = 15$  ps. nm<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>,  $G = 10$  dB,  $\lambda_p = 1455$  nm,  $\lambda_s = 1550$  nm.

La courbe indiquée avec  $P_s(z=0) = -20$  dBm correspond au cas de non-déplétion de la pompe. L'augmentation de la puissance du signal entraîne la déplétion de la pompe. Ainsi, nous nous rendons compte que l'élévation de la puissance du signal diminue la valeur à basse fréquence de la fonction de transfert de RIN, mais augmente la fréquence de coupure. La déplétion de la pompe a donc une incidence sur ces deux valeurs. En réalité, ce comportement est comparable au cas de non-déplétion de la pompe en réduisant la longueur effective de la fibre optique ou en augmentant l'atténuation subie par l'onde pompe lors de la propagation dans la fibre optique [Headley 05].

Nous avons choisi pour modéliser notre problème d'utiliser les équations développées dans le cadre de la non-déplétion de la pompe. En modifiant l'atténuation à la longueur d'onde pompe, nous y incluons les pertes causées par le transfert de puissance dû à la diffusion Raman. Cela a pour incidence de réduire la longueur effective  $L_{eff}$ , où l'amplification agit. En conséquence, la valeur du gain Raman  $G_R$ , utilisée dans le cas de la non-déplétion de la pompe dans les équations (A.2) et (A.3), est également modifiée pour

prendre en compte la réduction de la longueur effective de la fibre optique (équation(A.4)). Le gain  $G_R$  dépend de la contribution de la diffusion Raman stimulée  $C_R.P_{P0}$ , calculée ou mesurée, et qui sature à cause de la déplétion de la pompe. Cette contribution, que nous nommons dans la suite  $G = C_R.P_{P0}$ , soit le gain Raman réel, correspond à la contribution de la diffusion Raman que nous avons calculée à la fin du chapitre 3 (§3.6). À partir de nos simulations, nous sommes donc capables de calculer le gain  $G$ , et nous pouvons en déduire une valeur théorique du gain Raman  $G_R$ . Les valeurs utilisées pour le calcul sont indiquées dans le Tableau A.1. Dans ce tableau sont reportées les pertes mesurées pour différentes puissances de la SLHP, ce qui permet de déterminer  $\alpha_p$ . Nous y indiquons également les valeurs de  $L_{eff}$  et de  $G_R$  dans le cas de la non-déplétion afin d'avoir une source de comparaison. Dans ce cas, la longueur effective est la même quelle que soit la puissance de la SLHP. Par ailleurs, nous ne connaissons pas la valeur du RIN de la SLHP, que nous notons  $RIN_P$ . Donc, nous calculons simplement la fonction de transfert de RIN  $T = RIN_S/RIN_P$ , car nous ne serons pas en mesure de calculer le RIN des données  $RIN_S$ .

Cas	$P_{SLHP}$	Pertes @ 1480nm	$\alpha_p$ (km <sup>-1</sup> )	$L_{eff}$ (km)	G (dB)		$G_R$	
					co-prop.	contra-prop.	co-prop	contra-prop
Non-déplétion		2,8 dB	$6,5.10^{-2}$	7,4				
Déplétion	30 dBm	3,2 dB	$7,4.10^{-2}$	7,1	6,6	6,7	2,9	3,0
	33 dBm	3,2 dB	$7,4.10^{-2}$	7,1	13,3	13,4	8,7	8,8
	36 dBm	15,2 dB	$3,5.10^{-1}$	2,8	13,4	13,2	2,3	2,3

Tableau A.1 : Données utilisées pour le calcul de la fonction de transfert de RIN.

Nous constatons que la longueur effective  $L_{eff}$  est peu modifiée lorsque la puissance de la SLHP est égale à 30 dBm ou à 33 dBm. En effet, le niveau de puissance généré autour de l'ASE autour de 1583,1 nm est négligeable et donc la pompe n'est pas encore dans un cas de déplétion. Par contre, la longueur effective diminue lorsque la puissance de la SLHP est égale à 36 dBm car la puissance est transférée de l'onde pompe à 1480 nm vers l'ASE autour de 1583,1 nm. Nous sommes dans le cas de la déplétion de la pompe. En conséquence, le gain Raman diminue pour 36 dBm (chapitre 3, §3.4), alors que sa valeur devrait être normalement environ égale à celle de 33 dBm dans le cas de la non-déplétion de la pompe. À partir de ces données, nous employons les équations (A.2) et (A.3) pour calculer la fonction de transfert du RIN  $T = RIN_S/RIN_P$  (Figure 4.9).



Nous complétons ce travail en calculant les fréquences de coupures correspondant aux résultats de la Figure 4.9. Nous ajoutons la fréquence de coupure calculée dans le cas de la non-déplétion de la pompe, qui sera identique quelle que soit la puissance de la SLHP. Les résultats sont donnés dans le Tableau A.2.

Cas	$P_{SLHP}$	$f_C$ (Hz)	
		co-prop.	contra-prop.
Non-déplétion		$1,0 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^3$
Déplétion	30 dBm	$1,2 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^3$
	33 dBm	$1,2 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^3$
	36 dBm	$5,4 \cdot 10^7$	$5,7 \cdot 10^3$

Tableau A.2 : Fréquence de coupure de la fonction de transfert de RIN en fonction de la puissance de la SLHP.



## Annexe B. Photographies du dispositif expérimental

Nous présentons des photographies du dispositif expérimental mis en place dans le cadre de la caractérisation en régime dynamique. La Figure B.1 présente le dispositif complet, tandis que la Figure B.2 présente l'interface BJ et la Figure B.3 présente le terminal. Le Tableau B.1 indique le nom des composants numérotés sur les figures.

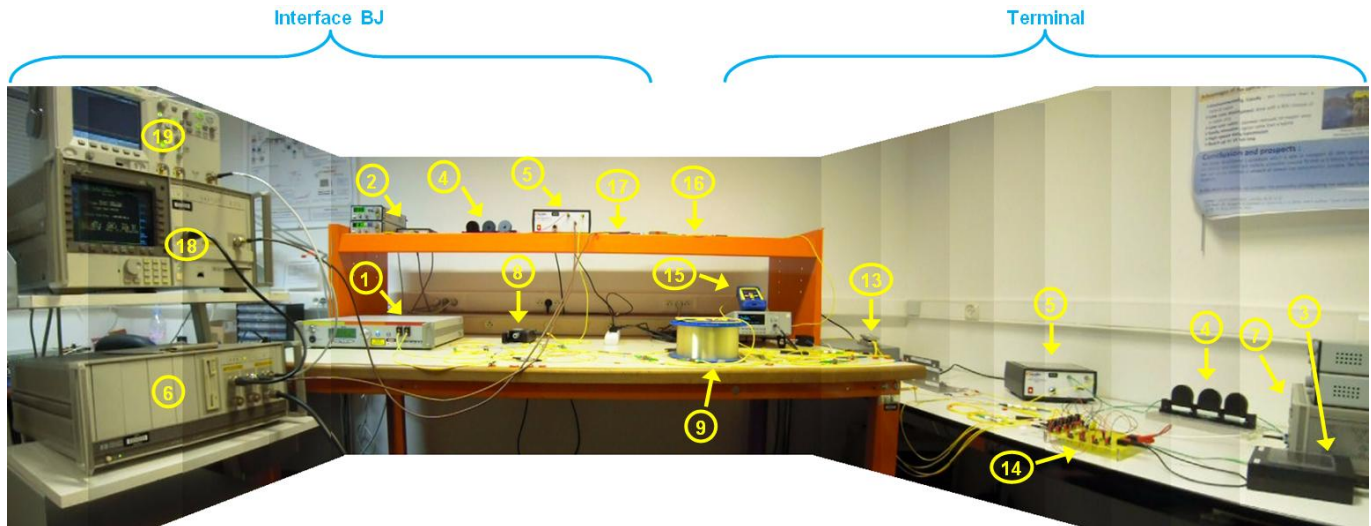


Figure B.1 : Photographie complète du dispositif expérimental employé dans le cadre de la caractérisation en régime dynamique.

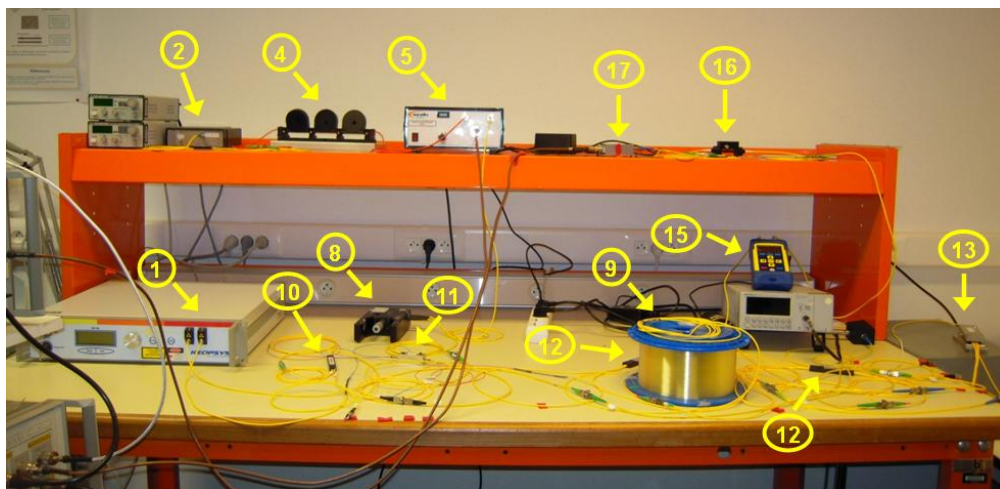


Figure B.2 : Photographie partielle du dispositif expérimental employé dans le cadre de la caractérisation en régime dynamique : interface BJ.

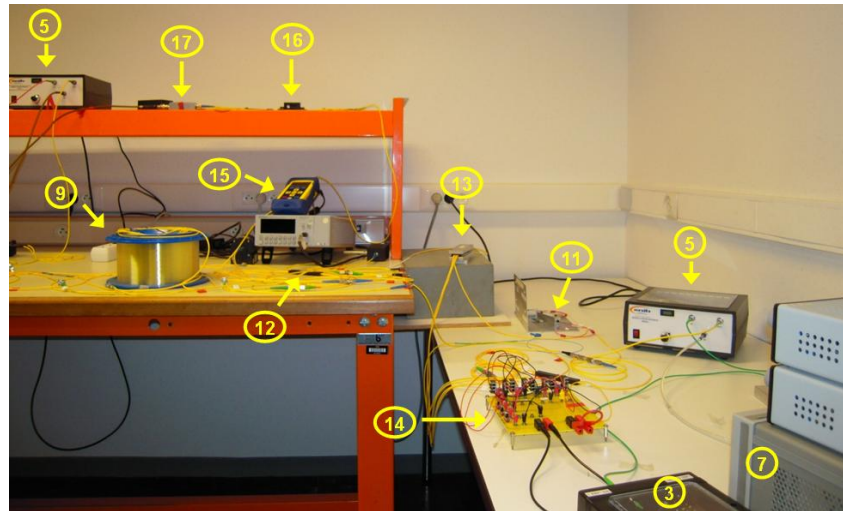


Figure B.3 : Photographie partielle du dispositif expérimental employé dans le cadre de la caractérisation en régime dynamique : terminal.

1	SLHP
2	Laser de données (source DFB reliée à son alimentation et au contrôleur en température) Source principale utilisée pour la qualification de la transmission des données
3	Laser de données (source DFB reliée à son alimentation et au contrôleur en température) Source secondaire utilisée pour la superposition du flux de données contra-propagatif
4	Contrôleur en polarisation
5	Modulateur Mach-Zehnder
6	Générateur d'impulsion PRBS, transmettant le signal à qualifier
7	Générateur d'impulsions pour le flux de données contra-propagatif
8	Atténuateur variable, employée pour les données dont on doit qualifier la transmission
9	Fibre optique monomode SMF-28, longue de 10 km
10	Circulateur optique
11	Mux/Démux
12	Coupleur 95/5
13	Coupleur à 4 voies
14	Étage de conversion O/E de la puissance, constitué de 4 cellules photovoltaïques
15	Atténuateur variable, employé pour choisir la puissance optique incidente au niveau du photorécepteur
16	Filtre optique, employée pour sélectionner la longueur d'onde des données à qualifier
17	Photorecepteur
18	Détecteur d'erreurs
19	Oscilloscope numérique

Tableau B.1 : Tableau de correspondance du nom des composants numérotés sur les figures 3.1, 3.2 et 3.3.

# Glossaire

- ACC : Automatic Current Control mode (mode de contrôle automatique en courant)
- AC/DC : Alternating Current/Direct Current (courant alternatif/courant continu)
- ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler (courantomètre à effet Doppler)
- AlGaAs : Arséniure de Gallium-Aluminium
- A/N : Analogique/Numérique
- ANTARES : Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch (astronomie avec un télescope à neutrino et recherche en environnement abyssal)
- APC : Automatic Power Control mode (mode de contrôle automatique en puissance)
- ARGOS : Advanced Research and Global Observation Satellite (satellite de recherché avancé et d'observation globale)
- ASE : Amplified Spontaneous Emission (émission spontanée amplifiée)
- ASSEM : Array of Sensors for long-term SEabed Monitoring of geohazards (réseau de capteurs à long terme de surveillance des risques géologiques des fonds marins)
- BER : Bit Error Ratio (taux d'erreur binaire)
- BJ : Boîte de Jonction
- CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor
- CTD : Conductivity Temperature Depth (conductivité température pression)
- DC-DC : Direct Current to Direct Current (courant continu vers courant continu)
- DEL : Diode ÉlectroLuminescente
- DFB : Distributed FeedBack (contre-réaction distribuée)
- DONET : Dense Ocean floor NETwork system (système d'un réseau de fond marin dense)
- DPA : Distributed Parametric Amplifier (amplification paramétrique distribuée)
- DRB : Double Rayleigh Backscattering (double rétrodiffusion Rayleigh)
- DSF : Dispersion Shifted Fiber (fibre à dispersion décalée)
- EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier (amplificateur fibrée dopée à l'Erbium)
- EMSO : European Multidisciplinary Seafloor Observatory (observatoire de fond de mer multidisciplinaire européen)
- E/O : Électrique/Optique
- ESONET : European Seafloor Observatory NETwork (réseau d'observatoire de fond de mer européen)
- FC : Fiber Connector (connecteur de fibre)
- FP : Fabry Pérot
- FPGA : Field-Programmable Gate Array (circuit logique programmable)
- FWM : Four Wave Mixing (mélange à quatre ondes)

GaAs : Arséniure de Gallium

GEOSTAR : GEophysical and Oceanographic STation for Abyssal Research (station géophysique et océanographique pour l'étude des fonds marins)

GeO-TOC : Geophysical and Oceanographic Trans Ocean Cable (câble transocéanique pour la géophysique et l'océanographie)

GI-MMF : Graded-Index Multi Mode Fiber (fibre multimode à gradient d'indice)

HAF : Hole Assisted Fiber (fibre assistée par trou)

HUGO : Hawaii Undersea Geo-Observatory (géo-observatoire de fond de mer de Hawaii)

I : Instrument

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

INFN : Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Institut national italien de Physique nucléaire)

InGa(Al)As : Arséniure d'Indium-Gallium-(Aluminium)

InP : Phosphure d'Indium

JAMSTEC : Japan Agency for Marine-earth Science and TEChnology (agence japonaise pour les sciences marines et terrestres et pour la technologie)

JDSU : JDS Uniphase, entreprise américaine

JMA : Japan Meteorological Agency (Agence météorologique japonaise)

Keopsys : Key Optical System, entreprise lannionaise

LEO-15 : Long-term Ecosystem Observatory at 15 m (observatoire à long terme d'un écosystème à 15 m)

MABEL : Multidisciplinary Antarctic Benthic Laboratory (laboratoire benthique multidisciplinaire d'Antarctique)

MARS : Monterey Accelerated Research System (système de recherche accéléré de Monterey)

MBARI : Monterey Bay Aquarium Research Institute (Institut de recherche de l'aquarium de la baie de Monterey)

MEMS : MicroElectroMechanical Systems (microsystème électromécanique)

MMF : Multi-Mode Fiber (fibre multimode)

MOVE : Meridional Overturning Variability Experiment (étude de la circulation thermohaline dans les Caraïbes)

MPI : Multiple Path Interference (interférence multi-trajets)

Nd:YAG : Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet (grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme)

NEMO : NEutrino Mediterranean Observatory (Observatoire méditerranéen à neutrino)

NEPTUNE : North-East Pacific Time-series Undersea Networked Experiments (Étude en réseau de fond de mer par séries temporelles dans le nord-est du Pacifique)

NRC : National Research Council (Conseil de recherche national)

O/E : Optique/Électrique

ORION : Ocean Research by Integrated Observation Networks (Étude océanique par des réseaux intégrés d'observation)

PCF : Photonic Crystal Fiber (fibre à cristal photonique)

PPC : Photovoltaic Power Converter (convertisseur photovoltaïque de puissance)

PRBS : Pseudo-Random Binary Sequence (séquence binaire pseudo-aléatoire)

RF : Radio Frequency (radiofréquence)

RIN : Relative Intensity Noise

ROV : Remote Operated Vehicle (véhicule téléguidé)

SAMO : Station Abyssale de Mesures Océanographique

S/B : Signal par rapport au Bruit

SBS : Stimulated Brillouin Scattering (diffusion Brillouin stimulée)

Si : Silicium

SIIM : Science Instrument Interface Module (module d'interface d'instruments scientifiques)

SI-MMF : Step-Index Multi Mode Fiber (fibre multimode à saut d'indice)

SLHP : Source Laser de Haute Puissance

SMF : Single Mode Fiber (fibre monomode)

SN-1 : Submarine Network-1 (réseau sous-marin 1)

SPM : Self Phase Modulation (auto-modulation de phase)

SRB : Simple Rayleigh Backscattering (simple rétrodiffusion Rayleigh)

TIA : TransImpedance Amplifier (amplificateur à transimpédance)

VCSEL : Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (Laser à cavité verticale émettant par la surface)

VENUS : Victoria Experimental Network Under the Sea (Réseau expérimental sous-marin de Victoria)

VENUS (Japon) : Versatile Eco-monitoring Network by Undersea-cable System (réseau d'éco-surveillance versatile par système de câble sous marin)

WDM : Wavelength Division Multiplexing (multiplexage par répartition en longueur d'onde)

XPM : Cross Phase Modulation (modulation de phase croisée)

Yb:YAG : Ytterbium-doped Yttrium Aluminium Garnet (grenat d'yttrium-aluminium dopé à l'ytterbium)





# Bibliographie

[ACIA 04] ACIA, « Impacts of a Warming Arctic », [En ligne, mise à jour : 21/10/2004]. Disponible : <http://amap.no/acia>. [Consulté le 24 février 2012]

[Adolfsson 89] M. B. Adolfsson, C. H. Einvall, P. Lindberg, J. Samuelsson, L. Ahlgren et al., « EHV Series Capacitor Banks: a New Approach to Platform to Grounds Signalling, Relay Protection and Supervision », *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no 2, pp. 1369-1378, 1989.

[Agrawal 01] G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3ème édition. San Diego : Academic Press, 2001.

[Agrawal 02] G.P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3ème édition. New York : J. Wiley & Sons, 2002.

[Ardid 07] M. Ardid, « ANTARES: A System of Underwater Sensors Looking for Neutrinos », dans *International Conference on Sensor Technologies and Applications*, Valence, Espagne, 2007, pp. 192-197.

[Banwell 93] T. C. Banwell, R. C. Estes, L. A. Reith, P. W. Shumate et E. M. Vogel, « Powering the Fiber Loop Optically-a Cost Analysis », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 11, no 3, pp. 481-494, 1993.

[Barnes 11] C. R. Barnes, M. M. Best, F. R. Johnson, L. Pautet, et B. Pirenne, « Challenges, Benefits and Opportunities in Operating Cabled Ocean Observatories: Perspectives from NEPTUNE Canada », in *IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, Tokyo, Japon, 2011, pp. 1-7.

[Beranzoli 98] L. Beranzoli, A. De Santis, G. Etiope, P. Favali, F. Frugoni et al., « GEOSTAR: GEophysical and Oceanographic STation for Abyssal Research », *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, vol. 108, no 2, pp. 175-183, 1998.

[Beranzoli 09] L. Beranzoli, A. De Santis, M. Calcara, A. Ciafardini, M. De Caro et al. « Multiparametric Seafloor Exploration: the Marsili Basin and Volcanic Seamount case (Tyrrhenian Sea, Italy) », in *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology (GES'09)*, Cambridge, United Kingdom, 2009, pp. 153-157.

[Bertin 98] V. Bertin, « ANTARES, a permanent deep undersea observatory for high energy cosmic neutrino detection », in *OCEANS '98 Conference Proceedings*, Nice, France, 1998, vol. 3, pp. 1792-1796.

[Blandin 03] J. Blandin, R. Person, J. M. Stout, P. Briole, V. Ballu, G. Etiope et al., , « ASSEM: a new concept of observatory applied to long term seabed monitoring of geohazards », in *Proceedings of OCEANS 2003*, San Diego, California, USA, 2003, Vol. 1, pp. 86-90.

[Blow 89] K.J. Blow and D. Wood, « Theoretical description of transient stimulated Raman scattering in optical fibers », *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 25, no 12, pp. 2665-2673, 1989.

[Böttger 08] G. Böttger, M. Dreschmann, C. Klamouris, M. Hübner, M. Röger et al., « An Optically Powered Video Camera Link », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no 1, pp. 39-41, 2008.

- [Boyd 90] R.W. Boyd, K. Rzazewski, et P. Narum, « Noise Initiation of Stimulated Brillouin Scattering », *Physical Review A*, vol. 42, no 9, pp. 5514-5521, nov. 1990.
- [Brahimi 10] H. Brahimi, « Étude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence », Th. Doct. : Microondes, Électromagnétisme et Optoélectronique. Toulouse : Université Paul Sabatier - Toulouse 3, 2010, 183 p.
- [Bromage 04] J. Bromage, « Raman Amplification for Fiber Communications Systems », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no 1, pp. 79-93, 2004.
- [Calcara 01] M. Calcara, L. Beranzoli, T. Braun, D. Calore, A. De Santis et al., « MABEL: A Multidisciplinary Benthic Laboratory For Deep-Sea, Long Term Monitoring In The Antarctic », *Terra Antarctica*, Vol. 8, no 2, pp. 151-118, 2001.
- [Campillo 06] A. L. Campillo, F. Bucholtz, K. J. Williams, et P. F. Knapp « Maximizing Optical Power Troughput in Long Fiber Optic Links », Naval Research Laboratory, Washington, USA, Rapport technique NRL/MR/5650--06-8946, 2006.
- [Chave 04] A. D. Chave, G. Waterworth, A.R. Maffei, et G. Massion, « Cabled Ocean Observatory System », *Marine Technology Society Journal*, Vol. 38, no 2, pp. 31–43, 2004.
- [Chluda 06] C. Chluda, « Bruit basse et moyenne fréquence des amplificateurs optiques distribuées à effet Raman », Th. Doct. : Électronique, Optronique et Systèmes. Montpellier : Université de Montpellier 3, 2006, 211 p.
- [Corning 02] Corning, « Corning SMF-28 Optical Fiber, Product Information », Corning Incorporated, New York, États-Unis, 2002.
- [Creed 05] E. L. Creed, S. Glenn, O.M. Shofield, H. Barrier, R.F. Petrecca et al., « LEO-15 Observatory - the next generation », dans *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS 2005*, Washington DC, Washington, 2005, Vol. 1, pp. 657-661.
- [DeLoach 78] B. C. DeLoach, R. C. Miller et S. Kaufman, « Sound Alerter Powered Over an Optical Fiber », *Bell System Technical Journal*, vol. 57, no 11, pp. 3309-3316, 1978.
- [Dewey 07] R. Dewey, A. Round, P. Macoun, J. Vervynck, et V. Tunnicliffe, « The VENUS Cabled Observatory: Engineering Meets Science on the Seafloor », in *OCEANS 2007*, Aberdeen, Écosse, 2007, pp. 1-7.
- [Dreschmann 10] M. Dreschmann, M. Hubner, M. Röger, O. Sander, C. Klamouris et al., « Reconfigurable Hardware for Power-over-Fiber Applications », in *International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL)*, 2010, pp. 525-531.
- [Duennebier 02] F. K. Duennebier, D. W. Harris, J. Jolly, J. Caplan-Auerbach, R. Jordan et al., « HUGO: the Hawaii Undersea Geo-Observatory », *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 27, no 2, pp. 218-227, 2002.
- [Fahrenbruch 96] A.L. Fahrenbruch, A. Lopez-Otero, J. G. Werthen et T. C. Wu, « GaAs- and InAlGaAs-Based Concentrator-Type Cells For Conversion of Power Transmitted By Optical Fibers », in *25<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist's Conf.*, Washington DC, USA, 1996, pp. 117-120.
- [Favali 03] P. Favali, SN-1 Team et NEMO Collaboration, « SN-1: The First Node of The Italian Seafloor Observatory Network – Background and Perspective », in *The 3<sup>rd</sup> International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, Tokyo, Japon, 2003, pp. 19-24.

- [Favali 06] P. Favali et L. Beranzoli, « Seafloor Observatory Science: a review », *Annals of Geophysics*, Vol. 49, no 2-3, pp. 515–567, 2006.
- [Favali 10] P. Favali, R. Person, C. R. Barnes, Y. Kaneda, J. R. Delaney et al., « Seafloor Observatory Science » in *OceansObs'09*, Venise, Italie, 2010, pp. 292-303.
- [Favali 11] P. Favali, L. Beranzoli, J. F. Rolin, C. Waldmann, M. Gillooly et al., « EMSO: European multidisciplinary seafloor observatory », in *IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, Tokyo, Japon, 2011, pp. 1-4.
- [Feng 98] M.Q. Feng, « Optically, Powered Electrical, Accelerometer and its Field Testing », *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, no 5, pp. 513-519, 1998.
- [Ferdinand 92] P. Ferdinand, *Capteurs à fibres optiques et réseaux associés*, Paris; Londres; New York (N. Y.): Tec & Doc, 1992.
- [Fludger 01] C.R.S. Fludger, V. Handerek, et R.J. Mears, « Pump to Signal RIN Transfer in Raman Fiber Amplifiers », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, no 8, pp. 1140–1148, 2001.
- [Foley 89] B. Foley, M. L. Dakss, R.W. Davies, et P. Melman, « Gain saturation in fiber Raman amplifiers due to stimulated Brillouin scattering », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 7, no 12, pp. 2024-2032, déc. 1989.
- [General Cable 12] « General Cable - Telecommunications Catalog », *General Cable - Telecommunications Catalog*. [En ligne]. Disponible : <http://catalog.proemags.com/publication/99e2edea#/99e2edea/1>. [Consulté le 04 septembre 2012].
- [Guermache 05] A. Gueremache, « Étude et réalisation de lasers de pompe à 1480nm pour l'amplification Raman », Th. Doct. : Électronique et Communication. Paris : Télécom Paris Tech, 2005, 144 p.
- [Hanzawa 10] N. Hanzawa, K. Kurokawa, K. Tsujikawa, T. Matsui, K. Nakajima et al., « Suppression of Fibre Fuse Propagation in Hole Assisted Fiber and Photonic Crystal Fiber », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no 15, pp. 2115-2120, 2010.
- [Headley 05] C. Headley et G. P. Agrawal, *Raman amplification in fiber optical communication systems*, 1 vol., Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005.
- [Ho 02] M. C. Ho, C. J. Chen, W. S. Wong et H.K. Lee, « Parametric Interactions Between Pumps and Signals in a Co-Pumped Raman Amplifier », in *Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO*, Washington DC, USA, pp. 481-482, 2002.
- [Hollenbeck 02] D. Hollenbeck et C. D. Cantrell, « Multiple-vibrational-mode model for fiber-optic Raman gain spectrum and response function », *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 19, no 12, pp. 2886-2892, déc. 2002.
- [IFREMER 02] IFREMER, « Campagne océanographique MOVE », *IFREMER, Coriolis Operational Oceanography, Institut Für Meereskunde Kiel*. [En ligne, mise à jour : 02/09/2002]. Disponible : <http://www.ifremer.fr/move/>. [Consulté le 5 mars 2012].
- [IFREMER 10] IFREMER, « ESONET NoE ». [En ligne]. Disponible : <http://www.esonet-noe.org/>. [Consulté le 18 mars 2012].
- [IFREMER 11] IFREMER, « Présentation de la flotte IFREMER : l'Atalante », [En ligne, mise à jour : 13/04/2011]. Disponible : <http://flotte.ifremer.fr/flotte/Presentation-de-la-flotte/Navires/Navires-hauturiers/L-Atalante>. [Consulté le 5 mars 2012].

- [IFREMER 12] IFREMER, « EMSO-EU - Home », [En ligne, mise à jour : janvier 2012]. Disponible : <http://www.emso-eu.org/management/>. [Consulté le 3 septembre 2012].
- [Jaouen 07] Y. Jaouen, *Les très hauts débits pour le transport et l'accès, Les Journées de l'Optique*, 9-11 octobre 2007, Presqu'île de Giens. Paris : ENST Paris, 2007.
- [JDSU 06a] JDSU, « Application Note: Powering Remote Data Links over Fiber », *JDSU, USA, Rapport technique prdlof\_wp\_pp\_ae*, 2006. [En ligne]. Disponible : [http://www.jdsu.com/ProductLiterature/prdlof\\_wp\\_pp\\_ae.pdf](http://www.jdsu.com/ProductLiterature/prdlof_wp_pp_ae.pdf). [Consulté le 27 juin 2009].
- [JDSU 06b] JDSU, « 4 V Photovoltaic Power Converter PPC-9LW », PPC-9LW datasheet, Déc. 2006.
- [Joindot 96] M. Joindot et I. Joindot, *Les télécommunications par fibres optiques*, Montrouge: Dunod, 1996.
- [Joseph 11] A. Joseph, *Tsunamis: Detection, Monitoring, and Early-Warning Technologies*. Amsterdam: Academic Press, 2011.
- [Kaneda 10] Y. Kaneda, « The advanced ocean floor real time monitoring system for mega thrust earthquakes and tsunamis-application of DONET and DONET2 data to seismological research and disaster mitigation- », in *IEEE OCEANS 2010*, Seattle, Washington, États-Unis, 2010, pp. 1-6.
- [Kasahara 98] J. Kasahara, H. Utada, T. Sato et H. Kinoshita, « Submarine cable OBS using a retired submarine telecommunication cable: GeO-TOC program », *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 108, n. 2, pp. 113-127, juin 1998.
- [Kasahara 00] J. Kasahara, Y. Shirasaki et H. Momma, « Multidisciplinary geophysical measurements on the ocean floor using decommissioned submarine cables: VENUS project », *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 25, no 1, pp. 111-120, 2000.
- [Kasahara 06] J. Kasahara, R. Iwase, T. Nakatsuka, Y. Nagaya, Y. Shirasaki, et al., « An Experimental Multi-disciplinary observatory (VENUS) at the Ryukyu Trench using the Guam-Okinawa Geophysical Submarine Cable », *Annals of Geophysics*, vol. 49, no 2-3, juin 2006.
- [Kasaya 09] T. Kasaya, K. Mitsuzawa, T. Goto, R. Iwase, K. Sayanagi et al., « Trial of Multidisciplinary Observation at an Expandable Sub-Marine Cabled Station "Off-Hatsushima Island Observatory" in Sagami Bay, Japan », *Sensors*, Vol. 9, no 11, pp. 9241-9254, nov. 2009.
- [Kashyap 88] R. Kashyap et K.J. Blow, « Observation of Catastrophic Self-Propelled Self-Focusing in Optical Fibres », *Electronics Letters*, vol. 24, no 1, pp. 47-49, janv. 1988.
- [Kawaguchi 98] K. Kawaguchi, H. Momma, et R. Iwase, « VENUS PROJECT-submarine cable recovery system », in *Proceedings of the 1998 International Symposium on Underwater Technology*, 1998, pp. 448-452.
- [Kawaguchi 07] K. Kawaguchi, E. Araki, et Y. Kaneda, « A Design Concept of Seafloor Observatory Network for Earthquakes and Tsunamis », in *Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, Tokyo, Japon, 2007, pp. 176-178.
- [Keïta 06] K. Keïta, « Amplification Raman stimulée de signaux hyperfréquences sur porteuse optique », Th. Doct. : Physique. Paris : Université de Paris XI Orsay, 2006, 172 pp.
- [Keopsys 06] Keopsys, « C-band High Power Fiber Amplifier », Key Optical Systems, Keopsys, Lannion, France, 2006.

- [Kirkham 89] H. Kirkham et A. R. Johnston, « Optically powered data link for power system applications », *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no 4, pp. 1997-2004, 1989.
- [Kobyakov 10] A. Kobyakov, M. Sauer, et D. Chowdhury, « Stimulated Brillouin scattering in optical fibers », *Advances in Optics and Photonics*, vol. 2, no 1, pp. 1-59, mars 2010.
- [Kung 97] A. Kung, « L'émission laser par diffusion Brillouin stimulée dans les fibres optiques », Th. Doct. : Sciences Techniques. Lausanne : École Polytechnique de Lausanne, 1997, 165 p.
- [Lanticq 08] V. Lanticq, S. Jiang, R. Gabet, Y. Jaouen, S. Delépine-Lesoille, et al., « Mesure auto-référencée du coefficient de gain Brillouin dans les fibres optiques monomodes », *Journées Nationale de l'Optique Guidée (JNOG)*, 20-22 octobre 2008, Lannion, France, 2008, pp. 392-394.
- [MBARI 09] MBARI. « The MARS Ocean Observatory Testbed ». [En ligne, mise à jour : 07/02/2012]. Disponible : <http://www.mbari.org/mars/connecting.html>. [Consulté le 16 mars 2012].
- [McGlade 84] S. M. McGlade et J. R. Jones, « An Optically Powered vibrating Quartz Force Sensor », *GEC Journal of Research (U.K.)*, vol. 2, no 2, pp. 135-138, 1984.
- [Mermelstein 02] M. D. Mermelstein, C. Headley, et J.C. Bouteiller, « RIN Transfer Analysis in Pump Depletion Regime for Raman Fibre Amplifiers », *Electronics Letters*, vol. 38, no 9, pp. 403-405, 2002.
- [Miller 79] R.C. Miller et R. B. Lawry, « Optically Powered Speech Communication Over a Fiber Lightguide », *Bell System Technical Journal*, vol. 58, no 7, pp. 1735-1741, 1979.
- [Miller 82] R.C. Miller, B. C. DeLoach, T. S. Stakelon et R. B. Lawry, « Wideband, bidirectional lightguide communication with an optically powered audio channel », *The Bell system technical journal*, vol. 61, no 7, pp. 1359-1365, 1982.
- [Miyakawa 04] H. Miyakawa, Y. Tanaka et T. Kurokawa, « Design Approaches to Power-Over-Optical Local-Area-Network Systems », *Applied Optics*, vol. 43, no 6, pp. 1379-1389, 2004.
- [Miyakawa 06] H. Miyakawa, Y. Tanaka, et T. Kurokawa, « Optical Power and Signal Transmission with WDM Single-Mode Fiber Optic Systems », in *Renewable Energy 2006 Proceedings*, 2006, pp. 317-320.
- [Momma 92] H. Momma, K. Mitsuzawa, T. Matsumoto, et H. Hotta, « Long-term Sea Floor Observations In JAMSTEC », in *Proceedings of IEEE OCEANS '92. « Mastering the Oceans Through Technology »*, Newport, Rhode Island, 1992, Vol. 2, pp. 697-700.
- [Namiki 06] S. Namiki, K. Seo, N. Tsukiji et S. Shikii, « Challenges of Raman Amplification », *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no 5, pp. 1024-1035, 2006.
- [Nauvelade 90] F. Nauvelade, « Réseau à fibres optiques de capteurs intelligents et optoalimentés », Th. Doct. : Instruments et mesures. Bordeaux : Université de Bordeaux 1, 1990, 442 p.
- [Neveux 90] L. Neveux, « Optoalimentation de capteurs par fibre optique », Th. Doct. : Sciences appliquées. Nice : Université de Nice - Sophia Antipolis, 1990, 155 p.
- [Neveux 91] L. Neveux, M. Chiaramello, T. Devreese, P. Schweizer, « Réseau bidirectionnel de capteurs opto-alimentés », *Spectra 2000*, vol. 19, no 156, pp. 48-50, 1991.

- [NRC 00] National Research Council, *Illuminating the hidden planet: the future of seafloor observatory science*. Washington DC, Washington : The National Academies Press, 2000, pp. 135.
- [OceanLab 02] Université d'Aberdeen. « ESONET: East Sicily ». *Oceanlab*. [En ligne]. Disponible : <http://www.oceanlab.abdn.ac.uk/esonet/sicily.php>. [Consulté le 18 mars 2012].
- [Ohte 84] A. Ohte, K. Akiyama, I. Ohno et E. L. Moore, « Optically-Powered Transducer with Optical-Fiber Data Link », *SPIE Fiber Optic and Laser Sensors II*, vol. 478, pp. 33-38, 1984.
- [Parolari 03] P. Parolari, L. Marazzi, L. Bernardini, et M. Martinelli, « Double Rayleigh scattering noise in lumped and distributed Raman amplifiers », *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 21, n° 10, p. 2224-2228, 2003.
- [Pena 99] R. Pena, C. Algora, I. R. Matias et M. Lopez-Amo, « Fiber-Based 205 mW (27% Efficiency) Power-Delivery System for an All-Fiber Network With Optoelectronic Sensor Units », *Applied Optics*, vol. 38, no 12, pp. 2463-2466, 1999.
- [Perhirin 11] S. Perhirin, et A. Pérennou, « Extension d'un réseau d'observation du milieu marin par des instruments faiblement consommateurs opto-alimentés, 1<sup>er</sup> rapport d'avancement », ENIB, Brest, France, Rapport Région Bretagne, oct. 2011.
- [Perhirin 12] S. Perhirin, et A. Pérennou, « Extension d'un réseau d'observation du milieu marin par des instruments faiblement consommateurs opto-alimentés, 2<sup>nd</sup> rapport d'avancement », ENIB, Brest, France, Rapport Région Bretagne, oct. 2012.
- [Person 06] R. Person, Y. Aoustin, J. Blandin, J. Marvaldi, et J.F. Rolin, « From bottom landers to observatory networks », *Annals of Geophysics*, vol. 49, no 2-3, 2006.
- [Person 07] R. Person, L. Beranzoli, C. Berndt, J. J. Dañobeita, M. Diepenbrocke et al., « The European Deep Sea Observatories Network of Excellence ESONET », in *IEEE OCEANS 2007*, Aberdeen, Écosse, 2007, pp. 1-6.
- [Phibbs 07] P. Phibbs et S. Lentz, « Cabled Ocean Science Observatories as Test Beds for Underwater Technology », in *IEEE OCEANS 2007*, Aberdeen, Écosse, 2007, pp. 1-5.
- [Puillat 12] I. Puillat, N. Lanteri, J. F. Drogou, J. Blandin, L. Gli, et al., « Open-Sea Observatories: A New Technology to Bring the Pulse of the Sea to Human Awareness », in *Oceanography*, M. Marcelli, Éd. InTech, 2012. Disponible : <http://www.intechopen.com/books/oceanography/open-sea-observatories-a-new-technology-to-take-the-pulse-of-the-sea-with-internet-in-the-ocean> [consulté le 16 octobre 2012].
- [Röger 08] M. Röger, G. Böttger, M. Dreschmann, C. Klamouris, M. Huebner et al., « Optically powered fiber networks », *Optics Express*, vol. 16, no 26, pp. 21821-21834, déc. 2008.
- [Ruffin 04] A.B. Ruffin, « Stimulated Brillouin Scattering: An Overview of Measurements, System Impairments, and Applications », in *Technical Digest: Symposium on Optical Fiber Measurements*, 2004, pp. 23-28.
- [Schuto 04] Y. Schuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi et R. Nagase, « Fiber Fuse Phenomenon in Step-Index Single-Mode Optical Fibers », *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 40, no 8, pp. 1113-1121, 2004.
- [Schweizer 87] P. Schweizer, L. Neveux et D.B. Ostrowsky, « Optical Fiber Powered Pressure Sensor », *SPIE Fiber Optic and Laser Sensors II*, vol. 798, pp. 82-85, 1987.

- [Seo 03] K. Seo, N. Nishimura, M. Shiino, R. Yuguchi et H. Sasaki, « Evaluation of high-power endurance in optical fiber links », *Furukawa Review*, no 24, pp. 18-22, 2003.
- [Shirasaki 04] Y. Shirasaki, H. Wakabayashi, Y. Honuchi, J. Kojima, Y. Ishikawa et al., « Study on ocean observatories by re-use of retired optical submarine cable », in *OCEANS '04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04*, 2004, Kobe, Japon, vol. 4, pp. 2170-2175.
- [Stolen 72] R.H. Stolen, E.P. Ippen, et A.R. Tynes, « Raman Oscillation in Glass Optical Waveguide », *Applied Physics Letters*, vol. 20, no 2, pp. 62-64, janv. 1972.
- [Stolen 84] R.H. Stolen, C. Lee and R.K. Jain, « Development of the stimulated Raman spectrum in single-mode silica fibers », *Journal of Optical Society of America B*, vol. 1, no 4, pp. 652-657, 1984.
- [Stolen 08] R.H. Stolen, « The early Years of Nonlinear Optics », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no 9, pp. 1021-1031, 2008.
- [Suyehiro 03] K. Suyehiro, H. Mikada et K. Asakawa, « Japanese Seafloor Observing Systems: Present and Future », *Marine Technology Society Journal*, Vol. 37, no 3, 102-114, 2003.
- [Takahashi 09] A. Takahashi, M. Kinoshita, K. Kashiwagi, Y. Tanaka et T. Kurokawa, « Fiber Sensor Network with Optical Power Supply », in *CLEO/Pacific Rim 2009*, Shanghai, Chine, 2009.
- [Tamura 91] T. Tamura, T. Togawa et P. A. Oberg, « Fiber Optic Power-Feed System », in *Solid-State Sensors and Actuators, TRANSDUCERS '91*, San Francisco, CA, USA, 1991, pp. 828-831.
- [Valdy 07a] P. Valdy, « Projet Deep Sea Net », *Ocean Bottom Seismometer* [En Ligne]. Disponible : <http://www.obs-vlfr.fr/GeosciencesAzur/OBS/article.php?idarticle=33>, [Consulté le 9 décembre 2008].
- [Valdy 07b] P. Valdy, V. Ciausiu, P. Leon, P. Moriconi, V. Rigaud, et al., « Deep Sea Net: an affordable, and expandable solution for deep sea sensor networks », in *IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, Tokyo, Japon, 2007, pp. 172-175.
- [Wake 08a] D. Wake, A. Nkansah, N. J. Gomes, C. Lethien, C. Sion et al., « Optically Powered Remote Units for Radio-Over-Fiber Systems », *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no 15, pp. 2484-2491, 2008.
- [Wake 08b] D. Wake, N. J. Gomes, C. Lethien, C. Sion et J. P. Vilcot, « An Optically Powered Radio Over Fiber Remote Unit Using Wavelength Division Multiplexing », in *International Topics Meeting on the Microwave Photonics*, 2008, pp. 197-200.
- [Walrafen 82] G. E. Walrafen et P. N. Krishnan, « Model analysis of the Raman spectrum from fused silica optical fibers », *Applied Optics*, vol. 21, no 3, pp. 359-360, févr. 1982.
- [Werthen 05] J.G. Werthen, S. Widjaja, T. C. Wu et J. Liu, « Power over fiber: a review of replacing copper by fiber in critical applications », in *Proceedings of SPIE, the International Society of Optical Engineering*, San Diego, CA, USA, 2005, pp. 58710C.1-58710C.6.
- [Werthen 06] J.G. Werthen et M. Cohen, « Photonic Power: Delivering Power Over Fiber for Optical Networks », in *International Conference on Photonics in Switching '06.*, Héraklion, Crête, 2006, pp. 1-3.
- [Woodroffe 08] A. Woodroffe et A. Round, « Design and operation of a multi node cabled observatory », in *MTS/IEEE OCEANS 2008*, Quebec City, Canada, 2008, pp. 1-5.

[Xu 10] X. Xu, K. K. Y. Cheung, S. Yang, Y. Liang, T. I. Yuk et al., « Optically Powered WDM Signal Transmission System With Distributed Parametric Amplification », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no 16, pp. 1232-1234, 2010.



# Publications

## Revues internationales avec comité de lecture

- F. Audo, M. Guégan, V. Quintard, A. Pérennou, J. Le Bihan, Y. Auffret, « Quasi-all-optical network extension for submarine cabled observatories », *Optical Engineering*, vol. 50, no 4, Apr. 2011, pp. 045001–045008.

## Conférences internationales avec comité de lecture et actes

- S. Perhirin, F. Audo, V. Quintard, M. Guégan, A. Pérennou, et Y. Auffret, « Development of a quasi-all-optical extension devoted for expandable submarine cabled observatories », in *ESFRI Symposium 2011*, Brest, France, juin 2011.
- F. Audo, A. Pérennou, M. Guégan, V. Quintard, Y. Querrou et al., « All optical power supply and data transmission system for submarine instruments », in *OCOSS Conference*, Brest, France, June 2010.
- F. Audo, A. Pérennou, V. Quintard, M. Guégan, Y. Auffret, et al., « Feasibility study of an optical power supply and data transmission system for sea floor observatories », in *Semiconductor and Integrated Optoelectronics Conference*, Cardiff, Wales, Apr. 2009, pp. 51.

## Conférences nationales avec comité de lecture et actes

- F. Audo, S. Perhirin, M. Guégan, V. Quintard, A. Pérennou et Y. Auffret, « Utilisation de l'amplification Raman sur une liaison tout-optique de 10 km pour les observatoires de fond de mer », in *JNOG*, Marseille, France, juil. 2011, pp.122-124.
- F. Audo, A. Pérennou, M. Guégan, V. Quintard, Y. Querrou et al., « Extension tout optique d'un réseau d'observation du milieu marin », in *Séminaire PONANT*, Rennes, France, juil. 2010.
- F. Audo, A. Pérennou, V. Quintard, M. Guégan, Y. Auffret et al., « All Optical Extension for a Sea Floor Observatory Network », in *Day of Europole Mer Projects*, L'Aber Wrac'h, France, Nov. 2009.
- F. Audo, V. Quintard, A. Pérennou, M. Guégan, Y. Auffret, et al., « Architecture d'un réseau tout-optique d'alimentation et d'échange de données pour les observatoires de fond de mer », in *Les Télécoms et la Mer*, Brest, France, mars 2009.

## Rapports d'activités

- F. Audo, V. Quintard, A. Pérennou, M. Guégan et J. Le Bihan, « Opto-alimentation et transmission de données par voie optiques pour les observatoires de fond de mer, 3<sup>ème</sup> rapport d'avancement », ENIB, Brest, France, Rapport Région Bretagne, oct. 2011.
- F. Audo, Y. Querrou, V. Quintard, A. Pérennou, M. Guégan et J. Le Bihan, « Opto-alimentation et transmission de données par voie optiques pour les observatoires de fond de mer, 2<sup>nd</sup> rapport d'avancement », ENIB, Brest, France, Rapport Région Bretagne, oct. 2010.
- F. Audo, Y. Querrou, V. Quintard, A. Pérennou, M. Guégan et J. Le Bihan, « Opto-alimentation et transmission de données par voie optiques pour les observatoires de fond de mer, 2<sup>nd</sup> rapport d'avancement », ENIB, Brest, France, Rapport final, Contrat GIS N° 08/2 210 308 entre l'ENIB/RESO, l'IFREMER et le GIS Europole Mer, oct. 2010.

- F. Audo, V. Quintard, A. Pérennou, M. Guégan et J. Le Bihan, « Opto-alimentation et transmission de données par voie optiques pour les observatoires de fond de mer, 1<sup>er</sup> rapport d'avancement », ENIB, Brest, France, Rapport GIS Europôle Mer, oct. 2009.
- F. Audo, V. Quintard, A. Pérennou, M. Guégan et J. Le Bihan, « Opto-alimentation et transmission de données par voie optiques pour les observatoires de fond de mer, 1<sup>er</sup> rapport d'avancement », ENIB, Brest, France, Rapport intermédiaire, Rapport final, Contrat GIS N° 08/2 210 308 entre l'ENIB/RESO, l'IFREMER et le GIS Europôle Mer, juil. 2009.

### Séminaires

- A. Pérennou, F. Audo, S. Perhirin, V. Quintard, M. Guégan, « Opto-alimentation et transmission de données par fibre optique pour les observatoires de fond de mer », *Les Journées Europôle Mer*, Brest, 29 et 30 Mars 2012
- F. Audo, S. Perhirin, M. Guégan, V. Quintard, A. Pérennou et Y. Auffret, « Utilisation de l'amplification Raman sur une liaison tout-optique de 10 km pour les observatoires de fond de mer », in *Journées des Doctorants de l'ED SICMA 0373*, Brest, France, sept. 2011.
- S. Perhirin, F. Audo, V. Quintard, M. Guégan, A. Pérennou, et Y. Auffret, « Développement d'une extension quasi-tout-optique pour les observatoires câblés de fond de mer », in *Journées des Doctorants de l'ED SICMA 0373*, Brest, France, sept. 2011.
- A. Pérennou, F. Audo, S. Perhirin, V. Quintard, M. Guégan, « Opto-alimentation et transmission de données par fibre optique pour les observatoires de fond de mer », in *Séminaire GIS Europôle Mer*, juil. 2011.
- A. Pérennou, F. Audo, V. Quintard, M. Guégan, « Remote Powering of Underwater Sensor Networks », in *Séminaire CapilR*, Telecom Bretagne, Juil. 2010.
- F. Audo, « Opto-alimentation et transmission de données par voie optique pour les observatoires de fond de mer », in *Journées des doctorants de l'IFREMER*, Brest, France, oct. 2009.
- F. Audo, V. Quintard, A. Pérennou, M. Guégan, J. Le Bihan, « Opto-alimentation et transmission de données par voie optique pour les observatoires de fond de mer », in *Séminaire GIS Europôle Mer*, juil. 2009.

# Liste des figures

Figure 1.1 : Carte de la planète Terre et des principaux courants océaniques [ACIA 04].....	9
Figure 1.2 : Photographie du navire de recherche Atalante [IFREMER 2002]. ....	10
Figure 1.3 : Fonctionnement d'un observatoire autonome. ....	11
Figure 1.4 : Fonctionnement d'un observatoire à liaison acoustique.....	12
Figure 1.5 : Schéma d'un observatoire câblé. ....	13
Figure 1.6 : Observatoire câblé de fond de mer constitué de sismomètres (OBS) et d'une jauge de pression (TG) installé par le JMA dans la région de Tokai pour la prévention de séismes et de tsunamis [Joseph 11]. ....	14
Figure 1.7 : Carte schématique de l'observatoire de Hatsushima en 2005 [Kasaya 09].....	15
Figure 1.8 : Schéma fonctionnel de l'observatoire HUGO [Duennebier 02].....	16
Figure 1.9 : (a) Localisation des deux lignes de l'observatoire VENUS et (b) Architecture générale composée d'un nœud [Dewey 07]. ....	16
Figure 1.10 : Représentation de l'observatoire MARS situé dans la Monterey Bay [MBARI 09]. ....	17
Figure 1.11 : Concept d'un observatoire câblé de grande envergure [Favali 10]. ....	18
Figure 1.12 : (a) Représentation schématique du réseau NEPTUNE et (b) sa localisation géographique [Phibbs 07].....	18
Figure 1.13 : Schéma de concept de DONET [Kawaguchi 07]. ....	19
Figure 1.14 : Carte des emplacements des nœuds de EMSO/ESONET [Favali 11].....	20
Figure 1.15 : Architecture du réseau SN-1 - NEMO [Oceanlab 02].....	21
Figure 1.16 : Schéma du réseau Deep Sea Net [Valdy 07a]. ....	22
Figure 1.17 : Architecture de l'extension tout-optique connectée à un observatoire de fond de mer.....	23
Figure 1.18 : Schéma général d'un dispositif de puissance sur fibre. ....	24
Figure 1.19 : (a) Photographie et (b) schéma du démonstrateur de la sonnerie de téléphone opto-alimenté [DeLoach 78]. ....	25
Figure 1.20 : (a) Schéma du thermocouple opto-alimenté et (b) méthodes de transmission optique bidirectionnelle [Ohte 84]. ....	26
Figure 1-21 : Schéma du dispositif d'opto-alimentation d'un capteur de pression [McGlade 84]. ....	26
Figure 1.22 : Schéma du dispositif opto-alimenté du transducteur de courant électrique [Adolfsson 89].....	27
Figure 1.23 : Schéma du dispositif d'opto-alimentation délivrant 205 mW électrique à 100 m [Pena 99]. ....	28
Figure 1.24 : Schéma d'un réseau opto-alimenté en boucle : exemple d'une boucle à cinq postes [Ferdinand 92]. ....	29

Figure 1.25 : Schéma du réseau à deux voies pour vingt capteurs [Ferdinand 92] (Ci désigne un coupleur optique, dont la part de puissance prélevée est indiquée par : 0,1 ou 0,3 ou 0,5).	29
Figure 1.26 : Schéma du réseau en arbre de quatre capteurs opto-alimentés [Pember 95].	30
Figure 1.27 : Schéma général de la transmission radio sur fibre opto-alimentée (a) avec deux fibres optiques [Wake 08a] et (b) avec une fibre optique et des Mux/Démux [Wake 08b].	32
Figure 1.28 : Schéma du dispositif de caméra vidéo opto-alimentée [Böttger 08].	32
Figure 1.29 : (a) Photographie de la plateforme déportée et (b) Schéma du dispositif de caméra vidéo motorisée opto-alimentée [Dreschmann 10].	33
Figure 1.30 : Schéma du réseau de capteurs opto-alimentés [Röger 08].	34
Figure 1.31 : (a) Schéma et (b) photographie du module d'énergie optique [JDSU 06a, Werthen 06].	35
Figure 1.32 : Schéma de la liaison tout-optique de JDSU [JDSU 06a].	35
Figure 1.33 : Schéma du dispositif opto-alimenté de transmission de musique [Miyakawa 06].	36
Figure 1.34 : Schéma d'un réseau opto-alimenté de capteurs déportés à 10 km [Takahashi 09].	37
Figure 1.35 : Schéma simplifié du dispositif expérimental d'opto-alimentation et de transmission de données multiplexées, associées à l'amplification paramétrique distribuée [Xu 10].	38
Figure 2.1 : Architecture de l'extension tout-optique avec une fibre optique.	48
Figure 2.2 : Atténuation spectrale de la fibre monomode SiO <sub>2</sub> [Agrawal 02].	51
Figure 2.3 : Rendement de transmission et de conversion O/E.	52
Figure 2.4 : Propagation de la fusion de fibre visible le long de la fibre [Namiki 06].	54
Figure 2.5 : Coupe longitudinale de la fibre optique (a) avant et (b) après propagation de la fusion.	54
Figure 2.6 : Processus de la fusion de fibre.	54
Figure 2.7 : Section de fibres optiques : (a) HAF et (b) PCF.	55
Figure 2.8 : Photographie d'un connecteur (a) avant et (b) après contamination.	55
Figure 2.9 : Processus de diffusion élastique : exemple de la diffusion Rayleigh ( $h$ : constante de Planck, $E$ : énergie, $\nu_0$ : fréquence optique du photon).	56
Figure 2.10 : Processus de diffusion spontanée Anti-Stokes (à gauche) et Stokes (à droite) ( $E_P$ : énergie de la pompe, $E_a$ : énergie du phonon acoustique, $E_{as}$ : énergie du photon anti-Stokes, $E_s$ : énergie du photon Stokes, $E_1$ : niveau d'énergie fondamental de la molécule, $E_2$ : niveau d'énergie vibrationnel de la molécule, $E_{virtuel}$ : niveau d'énergie virtuel).	57
Figure 2.11 : Processus de la diffusion stimulée ( $E_P$ : énergie de la pompe, $E_{SiO_2}$ : énergie du phonon acoustique, $E_s$ : énergie du photon signal, $E_1$ : niveau d'énergie fondamental de la molécule, $E_2$ : niveau d'énergie vibrationnel de la molécule, $E_{virtuel}$ : niveau d'énergie virtuel).	57
Figure 2.12 : Schéma du phénomène d'électrostriction associant la diffusion Brillouin spontanée et la diffusion Brillouin stimulée [Campillo 06] : (a) l'onde pompe interagit avec les vibrations du milieu et engendre une onde Stokes et des phonons supplémentaires ;	

(b) l'onde pompe et l'onde Stokes interagissent, ce qui engendre des phonons correspondant au décalage en fréquence Brillouin ; (c) les phénomènes de diffusion et d'électrostriction engendrent un effet cascade de ces mêmes phénomènes. ....	58
Figure 2.13 : Spectre du gain Raman pour la silice pour $\lambda_{\text{Pompe}} = 1 \mu\text{m}$ [Agrawal 01]. ....	59
Figure 2.14 : Architecture retenue du dispositif de transmission de l'énergie et des données. ....	63
Figure 2.15 : Principe de fonctionnement d'un laser à amplification Raman. ....	64
Figure 2.16 : Spectres relevés en sortie de la SLHP en fonction de la puissance émise (fenêtre comprise entre 1100 nm et 1650 nm). ....	65
Figure 2.17 : Évolution de la puissance optique en sortie de la SLHP, autour de 1480 nm et de 1583 nm, en fonction de la puissance totale délivrée par la SLHP. ....	65
Figure 2.18 : Spectres relevés en sortie de la SLHP en fonction de la puissance émise (fenêtre comprise entre 1450 nm et 1650 nm avec un zoom autour de 1479,5 nm). ....	66
Figure 2.19 : Évolution de la largeur de bande à mi-hauteur en fonction de la puissance émise par la SLHP. ....	66
Figure 2.20 : Puissance de seuil d'apparition de la diffusion Brillouin en fonction de la puissance émise par la SLHP. ....	67
Figure 2.21 : Spectre du laser DFB à 1550 nm, pour une puissance de 10 dBm (dans une fenêtre comprise entre 1450 nm et 1650 nm avec un zoom autour de 1550 nm). ....	67
Figure 2.22 : Schéma de fonctionnement du circulateur. ....	69
Figure 2.23 : Caractérisation en longueur d'onde (a) du circulateur (1) et (b) du circulateur (2). ....	69
Figure 2.24 : Schéma de fonctionnement du Mux/Démux 1480nm / 1550nm. ....	70
Figure 2-25 : Caractérisation en longueur d'onde du Mux/Démux (2). ....	70
Figure 2.26 : Caractéristiques en tension, en courant et en puissance électrique de la cellule photovoltaïque pour deux puissances optiques incidentes (50 mW et 100 mW) [JDSU 06b]. ....	71
Figure 2.27 : Schéma de principe de la caractérisation en rendement en fonction de la charge résistive. ....	72
Figure 2.28 : Évolution du rendement de conversion en fonction de la puissance optique incidente ( $\lambda = 1480 \text{ nm}$ ) avec optimisation de la résistance de charge. ....	72
Figure 2.29 : Évolution de la valeur optimale de la résistance de charge en fonction de la puissance optique incidente de manière à obtenir le rendement de conversion le plus élevé. ....	73
Figure 2.30 : Évolution du rendement de conversion en fonction de la longueur d'onde ( $P_{\text{incident}} = 3 \text{ dBm}$ , $R = 16 \text{ k}\Omega$ ). ....	74
Figure 2.31 : Schéma du montage de régulation en température pour la cellule photovoltaïque. ....	74
Figure 2.32 : Montage de régulation en température pour la cellule photovoltaïque. ....	75
Figure 2.33 : Évolution du rendement de conversion en fonction (a) de la température de régulation, pour différentes puissances optiques incidentes et (b) de la puissance optique incidente, pour différentes températures de régulation. La résistance de charge est optimisée pour chaque valeur de puissance incidente. ....	75

Figure 2.34 : Paramétrage du dispositif utilisé pour les simulations avec l'atténuation et les pertes d'insertion de chaque composant.....	76
Figure 2.35 : Simulation (a) du rendement de conversion et (b) de la puissance électrique délivrée par le module de conversion O/E en fonction de la puissance optique émise par le laser et du couplage d'entrée.....	77
Figure 2.36 : Schéma de fonctionnement du coupleur un vers quatre.....	77
Figure 2.37 : Caractérisation des quatre cellules photovoltaïques : (a) le rendement de conversion et (b) la puissance électrique en fonction de la puissance optique incidente à la longueur d'onde de 1480 nm.....	78
Figure 2.38 : Dispositif expérimental modifié au niveau du terminal.....	78
Figure 3.1 : Dispositif expérimental de transmission de l'énergie et des données ( $A_D$ , $A_M$ , $B_1$ , $B_2$ , $B_3$ , $B_4$ , $B_D$ , $B_M$ , $C_{1D}$ , $C_{1M}$ , $C_{2D}$ et $C_{2M}$ sont des points de mesure, et $A_P$ , $B$ , $F_M$ et $F_D$ sont des points d'intérêts pour la mesure).....	84
Figure 3.2 : Schéma de fonctionnement du coupleur 95/5.....	85
Figure 3.3 : Spectres relevés en différents points (points $A_P$ , $B$ et $C_{1M}$ ) pour une puissance laser réglée à 30 dBm, 33 dBm et 36 dBm.....	88
Figure 3.4 : Évolution de la puissance optique en sortie de la SLHP (en $A_P$ ) en fonction de la puissance délivrée par la SLHP, et en particulier à 1480 nm et autour de 1583 nm.....	89
Figure 3.5 : Évolution de la puissance optique en sortie de la fibre optique (en $B$ ) en fonction de la puissance délivrée par la SLHP, et en particulier à 1480 nm et autour de 1583 nm.....	90
Figure 3.6 : Évolution de la puissance optique rétrodiffusée par la fibre optique (en $F_M$ , avec une mesure en $C_{1M}$ , corrigée par le coefficient de couplage du coupleur) en fonction de la puissance délivrée par la SLHP, et en particulier à 1480 nm et autour de 1583 nm.....	90
Figure 3.7 : Schéma des trois montages d'association des cellules photovoltaïques.....	91
Figure 3.8 : Mesures (a) du rendement de conversion et (b) de la puissance électrique délivrée par le module de conversion O/E en fonction de la puissance émise par la SLHP pour les trois montages d'association des photodiodes étudiées.....	92
Figure 3.9 : Spectres relevés en sortie de la fibre optique (en $B$ ) sans et avec $P_{SLHP} = 30$ dBm, 33 dBm ou 36 dBm, et $P_{1550\text{ nm}} = 0$ dBm.....	93
Figure 3.10 : Illustration du calcul de la puissance réelle des données d'après les spectres optiques : nous retirons la puissance mesurée en (a) en l'absence de données à la puissance totale mesurée en (b) en présence des données.....	94
Figure 3.11 : Évolution des puissances obtenues en sortie de la fibre sur les bandes spectrales ( $1480 \pm 10$ ) nm, ( $1550 \pm 0,5$ ) nm et ( $1583 \pm 20$ ) nm avec $P_{1550\text{ nm}} = 0$ dBm, en fonction de la puissance de la SLHP.....	94
Figure 3.12 : Spectres optiques relevés en sortie de la fibre optique (sortie $B$ ) montrant la superposition de l'énergie (@1480 nm) et des données descendantes (@1550 nm ou @1585 nm).....	96
Figure 3.13 : Gain du signal de données apporté par l'amplification Raman dans la fibre optique de 10 km en fonction de la puissance émise par la SLHP pour deux longueurs d'ondes des données (1550 nm et 1585 nm), et pour les cas co- ou contra-propagatifs.....	97

Figure 3.14 : (a) Gain apporté par amplification Raman et (b) rapport S/B statique du signal de données en fonction de la longueur d'onde et pour deux puissances émises par la SLHP (33 dBm et 36 dBm).....	99
Figure 3.15 : Spectres optiques relevés au point B <sub>D</sub> , avec les données descendantes (P <sub>1550 nm</sub> = 0 dBm), sans ou en présence de la puissance (P <sub>1480 nm</sub> = 30 dBm ou 36 dBm).....	101
Figure 3.16 : Évolution de la puissance totale pour plusieurs longueurs d'ondes, mesurées (a) au point B et (b) au point B <sub>D</sub> , en fonction de la puissance de la SLHP. ....	102
Figure 3.17 : Bilan de liaison des données descendantes établi entre les sorties A <sub>D</sub> et B <sub>D</sub> en fonction de la puissance émise par le laser de puissance et de celle émise par le laser de données.....	103
Figure 3.18 : Spectres optiques relevés au point B <sub>M</sub> , avec les données montantes (P <sub>1550 nm</sub> = 0 dBm), sans ou en présence de la puissance (P <sub>1480 nm</sub> = 30 dBm ou 36 dBm).....	104
Figure 3.19 : Évolution de la puissance totale pour plusieurs longueurs d'ondes, mesurées (a) au point F <sub>M</sub> (mesure en C <sub>1M</sub> en tenant compte du couplage) et (b) au point B <sub>M</sub> , en fonction de la puissance de la SLHP. ....	105
Figure 3.20 : Bilan de liaison des données montantes, établi entre les points A <sub>M</sub> et B <sub>M</sub> en fonction de la puissance émise par la SLHP et de celle émise par le laser de données. ....	106
Figure 3.21 : Spectres optiques relevés en sortie B <sub>D</sub> , avec des données descendantes (P <sub>1550 nm</sub> = 0 dBm) et montantes (P <sub>1551 nm</sub> = -3 dBm) et pour deux puissances différentes (P <sub>1480 nm</sub> = 30 dBm ou 36 dBm).....	108
Figure 3.22 : Spectres optiques relevés en sortie B <sub>M</sub> , avec des données descendantes (P <sub>1550 nm</sub> = 0 dBm) et montantes (P <sub>1551 nm</sub> = -3 dBm) et pour deux puissances différentes (P <sub>1480 nm</sub> = 30 dBm ou 36 dBm).....	108
Figure 3.23 : Évolution de la puissance totale pour plusieurs longueurs d'ondes, mesurées (a) au point B <sub>D</sub> et (b) au point B <sub>M</sub> , en fonction de la puissance de la SLHP.....	109
Figure 3.24 : Bilan de liaison (a) des données descendantes établi entre les points A <sub>D</sub> et B <sub>D</sub> et (b) des données montantes établi entre les points A <sub>M</sub> et B <sub>M</sub> , en fonction de la puissance de la SLHP et pour différentes configurations des puissances des lasers de données.....	110
Figure 3.25 : Spectre du coefficient de gain Raman d'une fibre optique en silice avec $\lambda_p = 1 \mu\text{m}$ , en fonction du décalage en fréquence par rapport à la fréquence pompe [Stolen 72, Agrawal 02].....	112
Figure 3.26 : Modélisation du coefficient de gain Raman et des treize composantes se superposant.....	114
Figure 3.27 : Coefficient de Gain Raman en fonction de la longueur d'onde avec (a) $\lambda_p = 1480 \text{ nm}$ et (b) $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$ . ....	114
Figure 3.28 : Schéma simplifié du phénomène de double rétrodiffusion Rayleigh [Parolari 08].....	119
Figure 3.29 : Résultats de la simulation et de la caractérisation expérimentale, de la puissance en sortie de la fibre optique à différentes longueurs d'ondes pour les cas suivants : (a) transmission de la SLHP uniquement, (b) superposition de la puissance et des données descendantes, (c) superposition de la puissance et des données montantes, (d) superposition de la puissance et des données descendantes et montantes.....	125

Figure 3.30 : Évolution de la contribution de chaque phénomène, sous la forme d'un bilan de liaison, en fonction de la puissance de la SLHP sur : (a) la puissance à 1480 nm, (b) les données descendantes à 1550 nm, (c) les données montantes à 1550 nm et (d) l'ASE autour de 1583 nm.....	127
Figure 4.1 : Dispositif expérimental de qualification du BER ( $A_D$ , $A_M$ , $B_D$ , et $B_M$ , sont des points de mesure). .....	133
Figure 4.2 : Caractérisation de la conversion puissance/tension du photorécepteur FEMTO HCA-S.....	134
Figure 4.3 : (a) Exemple d'un diagramme de l'œil, accompagné des indications de mesure et (b) mesure de l'histogramme, servant à la mesure du BER. ....	136
Figure 4.4 : Diagrammes de l'œil relevés en sortie de la source de données ( $A_D$ et $A_M$ ), en sortie du dispositif dans le sens descendant ( $B_D$ ) et dans le sens montant ( $B_M$ ), selon la puissance de la SLHP. ....	140
Figure 4.5 : Diagrammes de l'œil relevés en sortie de la source de données ( $A_D$ et $A_M$ ), en sortie du dispositif dans le sens descendant ( $B_D$ ) et dans le sens montant ( $B_M$ ), selon la puissance de la SLHP, dans le cas des données échangées simultanément. ....	142
Figure 4.6 : Comparaison des mesures du BER dans le cas de la ligne de base ( $A_D$ ou $A_M$ ), des données descendantes ( $B_D$ ) et des données montantes ( $B_M$ ) en l'absence de puissance, en fonction de la puissance optique maximale incidente sur le photorécepteur. ....	143
Figure 4.7 : Comparaison des mesures du BER dans le cas de la ligne de base ( $A_D$ ), et des données descendantes ( $B_D$ ) en présence de différents niveaux de la puissance à 1480 nm, en fonction de la puissance optique maximale incidente sur le photorécepteur. ....	143
Figure 4.8 : Comparaison des mesures du BER dans le cas de la ligne de base ( $A_M$ ), et des données montantes ( $B_M$ ) en présence de différents niveaux de la puissance à 1480 nm, en fonction de la puissance optique maximale incidente sur le photorécepteur. ....	144
Figure 4.9 : Fonction de transfert de RIN en fonction de la fréquence de modulation de la pompe, dans le cadre de notre application. ....	146
Figure 4.10 : Chronogrammes relevés en sortie de la source de données ( $A_D$ et $A_M$ ), en sortie du dispositif dans le sens descendant ( $B_D$ ) et dans le sens montant ( $B_M$ ), pour différents niveaux de la puissance de la SLHP.....	150
Figure 4.11 : Architecture détaillée du terminal (alimentation : flèche rouge en pointillées). ....	151
Figure A.1 : Transfert de RIN dans le cas de co-propagation et de contra-propagation de la pompe et du signal en fonction de la fréquence [Fludger 01]. Paramètres : $\alpha_P = 0.29$ dB/km, $L = 10$ km (trait plein) et $80$ km (trait pointillés), $D = 15.6$ ps.nm <sup>-1</sup> .km <sup>-1</sup> , $G = 10$ dB, $\lambda_P = 1455$ nm, $\lambda_S = 1550$ nm. ....	162
Figure A.2 : Fonction de transfert de RIN en fonction de la fréquence pour les cas de co-propagation et de contra-propagation [Mermelstein 02]. Paramètres : $\alpha_P = 0.24$ dB/km, $\alpha_S = 0.19$ dB/km, $L = 100$ km, $D = 15$ ps. nm <sup>-1</sup> .km <sup>-1</sup> , $G = 10$ dB, $\lambda_P = 1455$ nm, $\lambda_S = 1550$ nm. ....	163
Figure B.1 : Photographie complète du dispositif expérimental employé dans le cadre de la caractérisation en régime dynamique. ....	167
Figure B.2 : Photographie partiel du dispositif expérimental employé dans le cadre de la caractérisation en régime dynamique : interface BJ.....	167



Figure B.3 : Photographie partiel du dispositif expérimental employé dans le cadre de la caractérisation en régime dynamique : terminal. ....	168
---	-----

# Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Principales caractéristiques des applications de la puissance sur fibre en fonction de la longueur de la fibre optique [Miyakawa 04, Werthen 05].....	31
Tableau 1.2 : Principales SLHP [Miyakawa 04, Werthen 05]. .....	38
Tableau 1.3 : Fibres optiques employées pour l'opto-alimentation [Miyakawa 04, Werthen 05].....	39
Tableau 1.4 : Cellules photovoltaïques de puissance [Miyakawa 04, Werthen 05].....	39
Tableau 2.1 : Principales caractéristiques des circulateurs. ....	69
Tableau 2.2 : Principales caractéristiques des Mux/Démux.....	70
Tableau 2.3 : Principales caractéristiques du coupleur un vers quatre.....	77
Tableau 3.1 : Principales caractéristiques des coupleurs 95/5. ....	85
Tableau 3.2 : Comparaison des trois montages d'association des cellules photovoltaïques ( $P_{SLHP} = 36$ dBm). ....	92
Tableau 3.3 : Comparaison du gain du signal co-propagatif dans la fibre optique aux longueurs d'ondes de 1550 nm et 1585 nm pour différentes puissances de la SLHP.....	97
Tableau 3.4 : Valeurs des paramètres utilisés pour le modèle du coefficient de gain Raman [Hollenbeck 02].....	113
Tableau 4.1 : BER mesurés aux différents points de mesure du dispositif selon la puissance de la SLHP. ....	139
Tableau 4.2 : BER mesurés aux différents points de mesure du dispositif selon la puissance de la SLHP, dans le cas des données échangées. ....	141
Tableau 4.3 : Tableau de synthèse de la caractérisation du dispositif en fonction de la puissance de la SLHP (* : mesure non réalisée). ....	148
Tableau A.1 : Données utilisées pour le calcul de la fonction de transfert de RIN. ....	164
Tableau A.2 : Fréquence de coupure de la fonction de transfert de RIN en fonction de la puissance de la SLHP. ....	165
Tableau B.1 : Tableau de correspondance du nom des composants numérotés sur les figures 3.1, 3.2 et 3.3. ....	168



Ce travail a été soutenu par le FEDER, la région Bretagne, le GIS Europôle MER, et par l'IFREMER dans le cadre du projet OptoAlim (contrat GIS N° 08/2 210 308).



## « Marque page » pour la lecture du chapitre 3

Nous présentons en complément ce « marque-page » qui pourra être utile lors de la lecture du chapitre 3 pour localiser les points de mesure et les points d'intérêts pour la mesure.

La Figure MP.1 présente le dispositif expérimental complet pour la transmission de la puissance et des données descendantes et montantes. Nous retrouvons :

- la source laser de haute puissance (SLHP) ;
- les lasers de données descendantes et montantes ;
- les circulateurs ;
- les multiplexeurs/démultiplexeurs (Mux/Démux) ;
- un coupleur un vers quatre, nécessaire pour optimiser la conversion O/E de l'énergie (§ 2.2.4.b) ;
- deux coupleurs 95/5, ajoutés dans ce dispositif.

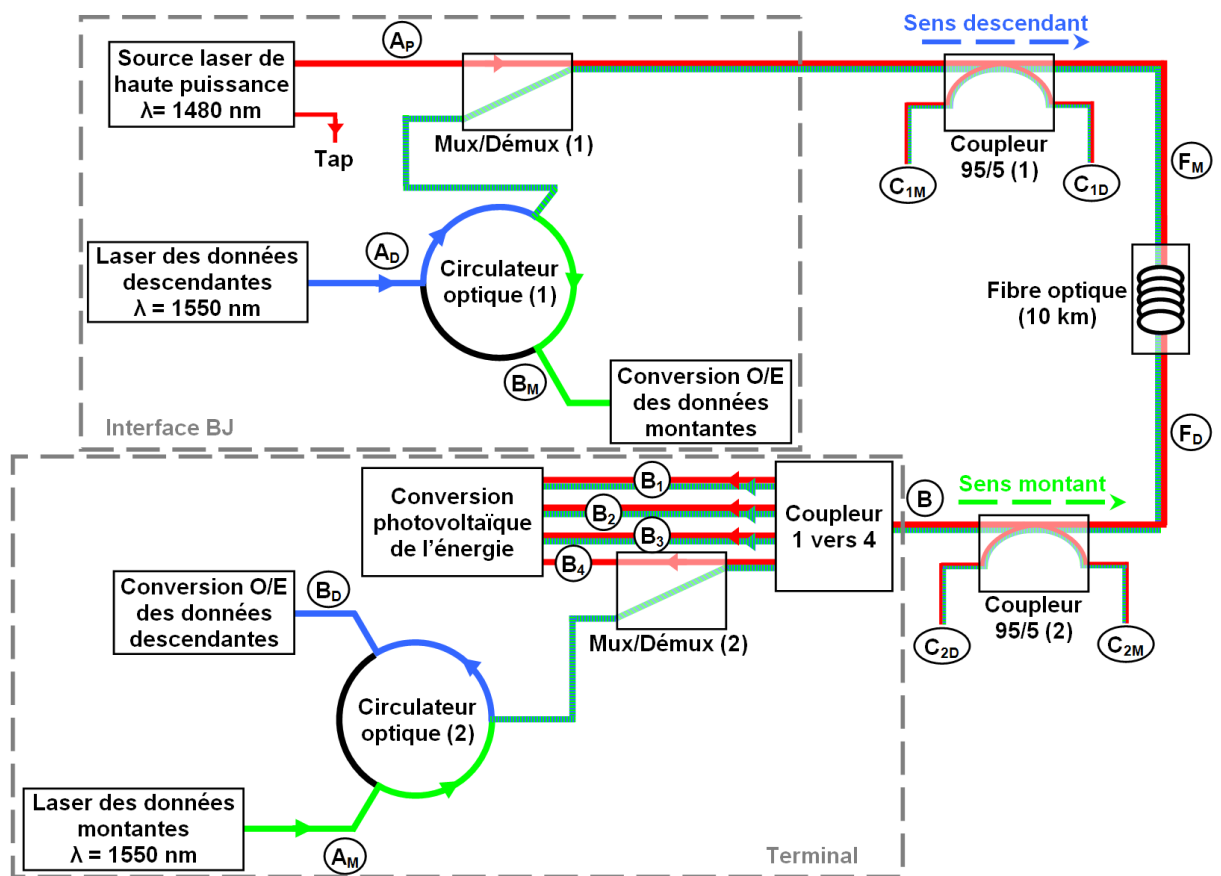


Figure MP.1 : Dispositif expérimental de transmission de l'énergie et des données ( $A_D$ ,  $A_M$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $B_4$ ,  $B_D$ ,  $B_M$ ,  $C_{1D}$ ,  $C_{1M}$ ,  $C_{2D}$  et  $C_{2M}$  sont des points de mesure, et  $A_P$ ,  $B$ ,  $F_M$  et  $F_D$  sont des points d'intérêts pour la mesure).

Les figures MP.2, MP.3, MP.4 et MP.5 présentent le bilan de liaison estimé du dispositif expérimental, en l'absence d'effets optiques non-linéaires, dans le cas où l'onde transmise est respectivement : l'énergie à 1480 nm, l'ASE autour de 1583 nm, les données descendantes à 1550 nm et les données montantes à 1550 nm. Sur chaque figure, nous notons les pertes des composants, ainsi que l'atténuation de la fibre optique.



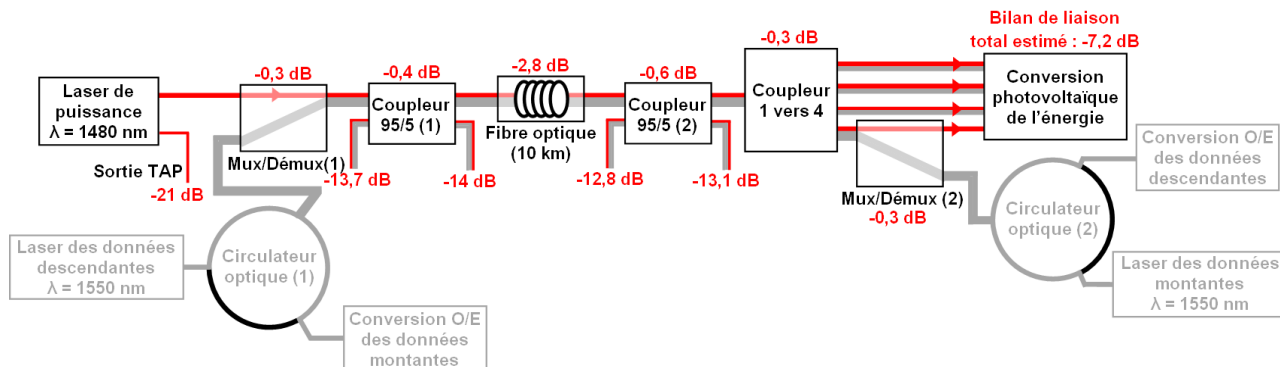


Figure MP.2 : Estimation du bilan de liaison du dispositif expérimental pour l'énergie à 1480 nm.

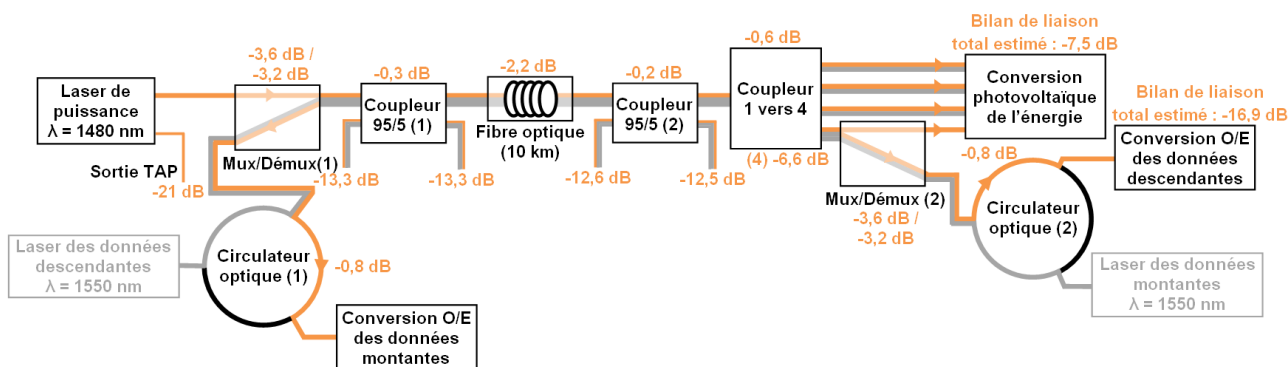


Figure MP.3 : Estimation du bilan de liaison du dispositif expérimental pour l'ASE autour de 1583 nm.

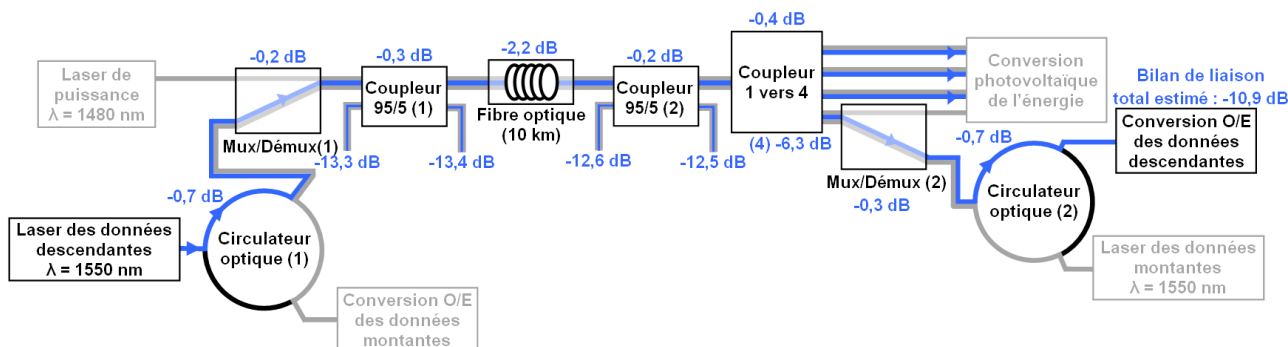


Figure MP.4 : Estimation du bilan de liaison du dispositif expérimental pour les données descendantes à 1550 nm.

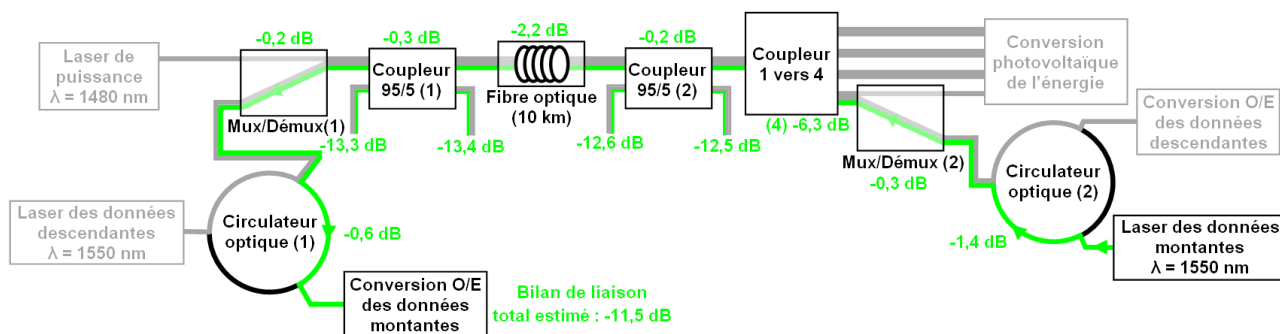


Figure MP.5 : Estimation du bilan de liaison du dispositif expérimental pour les données montantes à 1550 nm.



# Opto-alimentation et transmission de données par fibre optique pour les observatoires de fond de mer

## Résumé

**Mots clefs :** Opto-alimentation, Puissance sur fibre, Réseau de télécommunications optiques, Observatoire de fond de mer, Diffusion Raman

Ce mémoire de thèse est consacré à l'étude d'une liaison tout-optique longue de 10 km dédiée à l'extension d'un observatoire câblé de fond de mer existant afin d'atteindre de nouvelles zones d'exploration. Les travaux de recherche qui y sont rapportés démontrent la faisabilité de cette liaison tout-optique entre un instrument déporté et une station terrestre avec une seule fibre optique longue de 10 km, qui transmet simultanément la puissance, nécessaire à l'alimentation de l'instrument (quelques centaines de milliwatts), et des données bidirectionnelles en temps réel.

Le contexte de cette thèse est présenté au travers d'un état de l'art sur les observatoires câblés et sur la puissance sur fibre. Le choix de la fibre unique et la présence de fortes puissances optiques complexifient la mise en œuvre de cette extension tout-optique, et sont à l'origine de l'apparition d'interactions entre l'énergie optique dédiée à l'alimentation (@1480 nm) et les données échangées (@1550 nm). Tout au long de ce document, les choix technologiques retenus sont argumentés et les effets optiques non linéaires tels que les diffusions Raman, Brillouin, Rayleigh, l'Émission Spontanée Amplifiée (ASE) sont décrits, modélisés et analysés expérimentalement. L'extension tout-optique proposée a été caractérisée à la fois en régimes statique et dynamique par des mesures du bilan de liaison, du rapport signal à bruit (SNR) et du taux d'erreur binaire (BER). Les résultats obtenus montrent la possibilité de fournir 160 mW électrique à l'instrument déporté en utilisant une source optique continue de 33 dBm sans dégrader excessivement les données bidirectionnelles transmises simultanément ( $BER < 10^{-7}$ ).

## Power and Data over Fiber for Seafloor Observatories

## Abstract

**Keywords:** Optical power supply, Power-over-fiber, Optical communication network, seafloor observatory, Raman scattering

This thesis is devoted to the study of a 10 km long all-optical network dedicated to extend a current cabled seafloor observatory, in order to reach new exploration areas. The research work described in this thesis demonstrates the feasibility of this all-optical link between a remote instrument and a shore station with a single 10 km long optical fiber, which simultaneously transmits the energy required to supply the instrument (several hundred milliwatts) and bidirectional data in real time.

The thesis context is presented through an analysis of the cabled seafloor observatories and of the power-over-fiber. The choice of a single optical fiber and the presence of high optical power complicate the implementation of this all-optical extension, and they cause the appearance of interactions between the optical energy dedicated to the power supply (@1480 nm) and the exchanged data (@1550 nm). Throughout this document, the technological choices are explained and the optical nonlinear effects are described, simulated and analyzed experimentally, such as Raman, Brillouin, and Rayleigh scattering and Amplified Spontaneous Emission (ASE). The proposed all-optical extension has been characterized in static and dynamic regimes with measures of the optical link budget, the Signal-to-Noise Ratio (SNR), and the Bit Error Ratio (BER). The results show the possibility to power the remote instrument with 160 mW, when using a continuous high optical laser source of 33 dBm without huge degradation of the bidirectional data transmitted simultaneously ( $BER < 10^{-7}$ ).



**Lab-STICC, UMR CNRS 6285**

ENIB - Technopôle Brest Iroise – CS 73862

29238 Brest Cedex 3

Tél : + 33 (0)2 98 05 66 00 Fax : + 33 (0)2 98 05 66 10